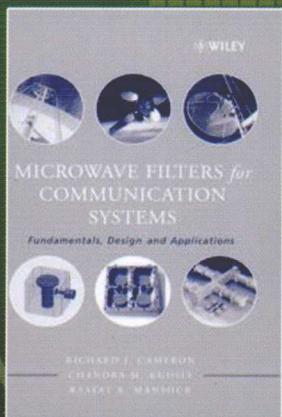


国外电子与通信教材系列



通信系统微波滤波器 ——基础、设计与应用

Microwave Filters for Communication Systems
Fundamentals, Design and Applications



[英] Richard J. Cameron
[加] Chandra M. Kudsia 著
[加] Raafat R. Mansour

王松林 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

通信系统微波滤波器 ——基础、设计与应用

Microwave Filters for Communication Systems
Fundamentals, Design and Applications

[英] Richard J. Cameron
[加] Chandra M. Kudsia 著
[加] Raafat R. Mansour

王松林 等译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

TH 713
22
20

内 容 简 介

本书是微波滤波器设计领域的权威著作,前两章介绍了通信系统的基本概念与理论;第3章至第7章叙述了各类滤波器传输函数及其电路网络综合方法;第8章至第10章详细说明了滤波器基本耦合矩阵理论及相关拓扑结构的综合方法与应用;第11章和第16章介绍了各类微波谐振器的理论与应用;第12章、第17章和第18章给出了微波低通滤波器,自均衡全通网络的滤波器的综合及多工器的设计与实现;第13章讨论了双模滤波器函数的优化及其波导结构应用;第14章和第15章介绍了电磁仿真软件在微波滤波器上的应用,并给出了多种工程优化实例;第19章介绍了计算机辅助调试的基本理论与应用;最后一章专门论述了高功率微波滤波器的设计与应用中的关键影响因素,针对复杂的无源互调问题进行了系统性的分析,并提出了解决方案。

本书可作为高年级本科生或研究生的工程教材,也适合作为广大微波设计人员必备的参考书籍。

Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design and Applications, Richard J. Cameron, Chandra M. Kudsia, Raafat R. Mansour

Copyright ©2007, John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, INC.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书简体中文版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。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 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2008-1380

图书在版编目(CIP)数据

通信系统微波滤波器——基础、设计与应用/(英)卡梅伦(Cameron, R. J.), (加)库德赛(Kudsia, C. M.), (加)曼索(Mansour, R. R.)著;王松林等译.—北京:电子工业出版社,2012.10
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design and Applications

ISBN 978-7-121-18200-6

I. 通… II. ①卡… ②库… ③曼… ④王… III. ①微波滤波器-高等学校-教材 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 210963 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚 特约编辑: 马爱文

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 33.25 字数: 851 千字

印 次: 2012 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

译 者 序

在电子工业出版社的大力支持下,微波家园论坛组织论坛里几位滤波器方面的技术专家共同翻译了 Richard J. Cameron, Chandra M. Kudsia 和 Raafat R. Mansour 三位在微波滤波器行业的顶尖专家所著的这本书。

本书以电路网络理论为基础,逐一介绍了各类复杂滤波器耦合矩阵的综合技术及工程应用,将理论与实践完美地结合起来。作者根据多年的研究经验,结合现代微波滤波器技术发展,创新地提出了许多新的方法与手段。本书是针对高性能滤波器的最完善的一本指导教材和设计工具书。通过对本书中实际案例的学习表明,只要掌握基本的数学理论、电路知识和仿真软件操作,就能够快速掌握滤波器设计方法,解决较复杂的滤波器工程问题。

微波家园论坛由王松林(论坛 ID: WSN, 主要研究兴趣包括无源器件的智能仿真与调试)创建于 2006 年。论坛以研究和学习微波技术为目的,旨在加强交流,为提高国内的微波射频技术水平而努力。本书的翻译由论坛组织,参加翻译的都是论坛的资深技术管理团队成员。其中第 1 章和第 2 章由叶耿翻译;第 3 章和第 4 章由刘云翻译;第 6 章由闫冬翻译;第 5 章、第 7 章和第 17 章由王一凡翻译;第 8 章至第 10 章由李刚翻译;第 11 章、第 14 章和第 16 章由王松林翻译;第 12 章、第 13 章和第 15 章由徐勤芬翻译;第 18 章和第 20 章由何进军翻译;第 19 章由潘峰翻译。王松林承担了本书的审校和翻译协调工作,并做了大量整理修订工作,以及与作者关于勘误内容的反复沟通与确认工作。限于我们的能力水平,对于译本出现的遗漏或翻译不妥之处,恳请广大读者给予批评指正。

为了方便大家的交流,我们在微波家园论坛(<http://bbs.mwhrf.com>)开辟了针对本书的讨论专区,期望大家能总结本书的不足及错误,共同在微波滤波器的理论研究和工程实践上不断学习与提高。同时,关于本书中部分章节中的计算实例,可以在本区相关主题下查找下载。微波家园管理团队期待着大家的光临。

最后感谢出版社给予了我们足够的耐心、帮助与理解!

Preface for the Chinese Readers

It gives us great pleasure that our book has been translated into Mandarin. We are indebted to all those who participated in this arduous exercise. Spread of knowledge is a good thing for mankind; and we hope this translation will set a trend in dissemination of knowledge worldwide.

Microwave filters play a critical role in the design of communication systems; this is especially true for wireless systems. A communication system must be able to satisfy the diverse needs of a multiplicity of users and, at the same time, it must be flexible to accommodate the changing requirements of the users over time. This is accomplished by dividing up the allocated frequency band into sub-bands in order to optimize the traffic flow and allow amplification of signals with acceptable levels of distortion. Microwave filters are essential to provide this function.

In this book, we have devoted a major chapter to system design. We believe that to be an effective engineer, it is important to understand the system requirements which of course reflect the business model of the communication system. This understanding allows one to perform practical filter tradeoffs, taking into account not only the electrical requirements, but also the operating environment, size and mass and manufacturing considerations. The intent of the book has been to provide the reader with the theoretical as well as the practical aspects of filter design.

In writing this book, we have borrowed heavily from our industrial experience, teaching courses at universities and interactions with the engineering community. It reflects a lifetime of experience in advancing the state-of-the-art in microwave filters and multiplexing networks. We are pleased to be able to share this experience with our Chinese colleagues at large, in the world of academia as well as those working in the industry.

Richard J. Cameron, Chandra M. Kudsia and Raafat R. Mansour

很高兴能看到我们这本书被翻译成了中文，在此感谢所有为之付出努力的人。世界上最美好的事情莫过于传授知识，我们期待本书中文版的发行能在全世界知识传播方面竖立一个榜样。

微波滤波器在通信系统设计中极为关键，尤其是在无线系统中的作用更为突出。通信系统必须满足广大用户的不同需求，同时还必须具有灵活性，以便随时适应用户的新需求。为了优化通信业务流量，使放大信号位于一个可接受的失真水平内，需要将分配频段划分为若干个子信道。微波滤波器正好可以实现这种功能。

本书使用了较大篇幅来介绍系统设计。我们确信，对于一个有经验的工程师来说，理解通信系统中的商业需求至关重要。这有利于工程师在设计滤波器过程中，可以很好地在电性能、工作环境、尺寸大小及制造因素之间进行折中。本书主要是指导读者将理论与实践经验相结合来完成滤波器的设计。

在这本书的编写过程中，我们借鉴了许多工业经验、大学授课讲义及工程领域的交流经验。本书反映了作者为了提高微波滤波器和多工网络的技术水平所付出的毕生努力。我们很开心，可以最大限度地分享这些经验给我们的中国同仁，无论是学术界的研究人员，还是工业界的同仁。

序

本人非常荣幸，能够为三位微波滤波器领域最杰出专家的这本巨著写序。在过去的 30 多年里，他们在提高滤波器性能的研究和发展方面取得了重大成就，开创了许多微波滤波器方面的新概念和新技术。今天的微波滤波器与 30 年前相比性能有了显著提高：更小的尺寸，更低的损耗，更好的通带平坦度，更高的带外抑制，通带至阻带更陡峭的过渡带，阻带的传输零点，对称或不对称的响应，群时延自均衡。并且，微波滤波器的设计方式发生了翻天覆地的变化。过去，设计人员只能使用近似电路模型和理想元件来模拟想要的性能，根据经验进行调试，产品周期很长。现在，结合滤波器综合技术，利用高速计算机，我们可以进行精确的电磁仿真。运用高效的优化算法软件，滤波器设计人员几乎可以很快地从绘图到最终产品，不需要根据经验修改或手工调试，大大缩短了产品周期，对提高和增强通信系统的容量也非常有效。

本书紧跟现代微波滤波器的基本原理和实际应用，介绍了大量以前没有系统化的相关知识。对于有经验的滤波器设计人员来说，本书是一本很好的参考书。对于高年级本科生和研究生而言，本书是一本优秀的微波滤波器教材。同时，对于希望提高微波滤波器的技术发展水平的滤波器研究人员来说，本书更是一个好向导。此外，通过本书，通信系统设计人员可以很好地了解到微波滤波器和多工网络目前的发展水平和局限性。这本书可以在理论和实践之间实现很好的平衡。

作者将从事卫星通信研究到蜂窝基站系统设计方面积累的丰富经验反映到本书中。这些经验对于即将进入这个工程领域的学生，从业人员，甚至整个微波工业界都有着毋庸置疑的益处。

ALI ATIA

前 言

本书由一个简单的通信系统模型开始，阐述了以下问题：

1. 无线通信系统中，可用带宽是否存在限制？
2. 可用带宽内信息传输的限制是什么？
3. 通信系统中，对成本敏感的参数有哪些？

本书针对滤波器网络在通信系统中不同部分的功能与要求，对上述问题进行了讨论，以便读者对不同的系统参数有所了解。接下来讨论了用于产生对称和不对称频率响应的广义低通原型滤波器函数的计算机辅助设计技术。通过引入一个假想的不随频率变化的电抗元件，得到了低通原型滤波器设计的基本公式。在实际带通和带阻滤波器中，不随频率变化的电抗元件表征谐振电路的频率偏移。缺少不随频率变化的电抗元件的经典滤波器函数，将产生对称的频率响应。根据滤波器函数的基本公式推导出的综合方法，可用于实现滤波器网络的等效集总参数模型。接下来的综合步骤将滤波器的电路模型转化为等效的微波结构。一般来说，运用众多现有的电路模型参数可以近似实现微波滤波器的物理结构参数。为了得到更加精确的物理尺寸，本书论述了运用基于现代电磁技术的方法和工具，可以任意精度确定滤波器的尺寸。相关理论将通过任意带宽和信道隔离的多工网络的设计来展示。其余一些章节主要讨论了计算机辅助调试和滤波器设计中的高功率因素。本书的目的是使读者对滤波器的要求和设计有一个全面的了解，并且对该领域中陆续出现的一些高级方法有足够的认识。本书通篇强调了在滤波器设计中的基本理论和实际影响因素。本书特色如下：

1. 滤波器设计中系统的影响因素。
2. 包含不随频率变化的电抗元件的滤波器函数的基本公式和综合方法。
3. 在大部分拓扑结构中，包含对称或不对称频率响应的广义低通原型滤波器的综合方法。
4. 应用基于电磁技术的方法来优化设计微波滤波器的物理结构尺寸。
5. 各种多工器结构的设计方法和折中方案。
6. 滤波器辅助调试技术。
7. 地面和太空应用中滤波器的高功率影响因素。

本书内容分为 20 章，具体内容分述如下。

第 1 章主要回顾了通信系统，特别是通信通道和系统中其他部分的关系。本章主要目的是给读者提供足够的背景知识，以便于他们理解滤波器在通信系统中的关键作用和要求。

第 2 章主要介绍了通信理论和一些电路理论，重点强调了在电路网络分析中我们比较熟悉的频率分析方法。

第 3 章论述了经典最大平坦、切比雪夫、椭圆函数等低通原型滤波器特征多项式的综合方法。本章对不随频率变化的电抗元件进行了论述，并通过运用它们产生不对称的频率响应，得出了一些结论。其中传输函数多项式包含复系数（在一些限制条件下），这与我们熟悉的有理实系数特征多项式有着明显的不同，从而为分析大部分低通原型域中的基本滤波器函数，如最小相位和非最小相位滤波器，对称或不对称频率响应的滤波器提供了基础。

第4章介绍了运用计算机辅助优化技术综合任意幅度响应的低通原型滤波器特征函数的方法。该方法关键是要确保优化过程的有效收敛,这主要是通过确立目标函数的解析梯度和建立与理想幅度响应的直接关系来实现的。它也适用于对称或不对称频率响应的最小相位和非最小相位滤波器。为了说明该方法的灵活性和有效性,本章给出了一些非常规滤波器的设计实例。

第5章回顾了一些在多端口微波网络分析中用到的基本概念。由于任意滤波器或多工器能够被分成小的二端口、三端口或 N 端口的级联形式,因此这些概念对于滤波器设计人员来说非常重要。接下来介绍了微波网络的5种矩阵表示形式,分别为 $[Z]$, $[Y]$, $[ABCD]$, $[S]$ 和 $[T]$ 矩阵。这些矩阵都是可以相互转化的,即任意一个矩阵的元件可以用其他的矩阵元件表示。熟悉这些矩阵的概念对于理解本书的内容来说是极为重要的。

第6章开篇复习了在滤波器网络设计中相关的一些重要散射参数关系。接着讨论了广义切比雪夫函数及其在产生传输和反射多项式中的应用,这些多项式可以用来综合含有任意传输零点的等波纹滤波器。本章最后主要讨论了预失真和双通带滤波器函数。

第7章介绍了基于 $[ABCD]$ 矩阵的滤波器综合方法。综合步骤分为两步。首先是确定无耗的集总元件电容、电感和不随频率变化的电抗元件的值,然后确定导纳变换器的值。应用这些变换器,使原型电路可以用一种相互耦合的微波谐振器结构来实现。使用这种方法综合出的对称和不对称频率响应的低通原型滤波器,其拓扑不仅是梯形的,而且还含有交叉耦合。这一方法可以推广到单终端滤波器的综合。本章中介绍的综合过程是一种普适的技术,可以应用到集总低通原型滤波器网络的综合。

第8章介绍了带通滤波器综合的 $N \times N$ 型耦合矩阵的概念。通过加入不随频率变化的电抗元件,综合方法经过修正后,也可以用来综合不对称的滤波器响应。然后,从 $N \times N$ 耦合矩阵分离出纯阻性和纯电抗性部分,可以将该设计过程拓展到 $N+2$ 型耦合矩阵。 $N+2$ 型耦合矩阵除了包含输入端与第一个谐振器的耦合,输出端与最后一个谐振器的耦合之外,还包含输入和输出端与其他谐振器的所有耦合,输入和输出直接耦合的情形。这种方法可以用来综合全规范型滤波器,并且简化了到其他拓扑结构的相似变换过程。以上综合过程产生的基本耦合矩阵,其所有耦合都位于限定位置。接下来就是确定包含最小耦合路径的拓扑结构(即全规范型),它可以通过矩阵的相似变换来实现。这种变换保证了在变换过程中,矩阵的特征值和特征向量不变,因此变换前后的滤波器响应也保持不变。这种综合方法具有两大优势:一是能够得到包含所有可能耦合的基本耦合矩阵,从而使针对耦合矩阵的后续变换中能够得到不同的滤波器拓扑结构。二是耦合矩阵代表了实际带通滤波器的拓扑结构。因此,能够知道实际带通滤波器的每一个参数值,如它的 Q 值、色散特性和灵敏度。这些信息使我们能够对实际滤波器性能做出更准确的判断,得出优化滤波器性能的方向。

第9章提出了一种相似变换的方法,本方法适用于双模滤波器网络的大部分拓扑结构。双模滤波器应用可实现一个谐振器中产生两个正交极化的简并模。其中谐振器可以是腔体的,介质盘片的,或者是平面结构的,这使得滤波器的体积可以显著减小。除了轴向形和折叠形结构,比较适用的结构还有级联四角元件和闭端形拓扑。本章末给出一些例子,并讨论了不同双模滤波器结构的灵敏度。

第10章介绍了两种应用极少的电路单元:提取极点和三角元件。这些单元可以用来实现一个传输零点。在滤波器网络中,它们可以级联其他的电路元件。这些单元的应用拓宽了拓扑结构的范围。最后,论述了盒形及其衍生结构(扩展盒形)的综合方法,并举例说明了其复杂的综合过程。

第11章介绍了确定微波谐振器的谐振频率和无载 Q 值的理论和实验方法。谐振器是任何一

个带通滤波器的基本组成单元。在微波频段，谐振器形状各异且包含许多结构形式。本章介绍了两种用来计算任意形状谐振器的谐振频率的方法——本征模分析和 S 参数分析。本章通过一些实例，应用基于电磁技术的商用软件（如 HFSS）来说明这两种方法的具体实现过程。本章也介绍了在矢量网络分析仪的极化显示模式下和标量网络分析仪的线性显示模式下，有载和无载 Q 值的详细测量步骤。

第 12 章论述了在微波频率实现低通滤波器的综合方法。对低通滤波器的典型的带宽要求为吉赫量级，使得集总元件模型不再适用于微波频段内的滤波器实现，需要运用分布元件来实现原型滤波器。本章开篇论述了公比线元件及其实现的分布低通原型滤波器。接下来讨论了适合构造实际低通滤波器的特征多项式和生成这个多项式的方法。最后论述了阶梯阻抗和集总/分布元件低通滤波器的综合方法。

第 13 章讨论了双模滤波器的实用设计理论。它包含工作于主模和高次模的双模谐振器的应用。本章给出了许多实例来说明它的设计过程。这些例子中包含轴向形，规范型，扩展盒形和提取极点型拓扑的滤波器，以及全电感耦合滤波器。本章还介绍了同时优化双模线性相位滤波器幅度和群时延的步骤。本章中给出的实例运用了第 3 章至第 11 章中的分析和综合方法。

第 14 章介绍了应用电磁仿真工具来设计微波滤波器。展示了如何运用电磁仿真工具，综合出与滤波器电路模型对应的微波滤波器的具体物理尺寸。首先计算的是从滤波器最佳的电路模型得到的物理尺寸。通过应用商业电磁仿真软件，可以计算得到比较精确的输入/输出及谐振器间耦合。应用 K 或 J 变换器模型，稍加改进就可以作为一种直接从耦合矩阵 $[M]$ 确定滤波器物理尺寸的方法。本章给出了介质谐振器、波导和微带滤波器的一些数值算例。为了使结构更简单，在非相邻谐振器之间引入负耦合这一方法，可以取得非常好的效果。电磁工具也显示了其在微波滤波器的物理实现上的优势。

第 15 章介绍了一些基于电磁技术的微波滤波器设计方法。最直接的方法就是应用具有优化功能的电磁仿真工具来优化一个滤波器的物理尺寸，使其得到一个理想响应。这在调试阶段是非常有效的，其中调试是通过优化工具而不是技术人员来完成的。这一方法的出发点是运用第 14 章介绍的技术得到的滤波器的具体尺寸。如果不采取任何简化措施，直接优化将非常耗时。但是，运用一些优化策略，包括自适应频率采样、神经网络和多维柯西方法，可以显著减少优化时间。本章详细介绍了两种基于电磁的高级技术：空间映射方法和粗糙模型方法，它们的应用极大地降低了计算时间。本章末给出了用空间映射方法和粗糙模型方法来确定滤波器尺寸的例子。

第 16 章介绍了各种结构的介质谐振器及滤波器的设计方法。商用软件如 HFSS 和 CST 都可以用来计算任意形状介质谐振器的谐振频率、场分布和 Q 值。应用这些工具，可以获得介质谐振器的前 4 个模式的场分布图。本章也论述了同轴谐振器的谐振频率和无载 Q 值的计算，同时也介绍了 Q 值、寄生响应、温漂和高功率等设计中的一些影响因素。本章末详细介绍了低温介质谐振器滤波器的设计和折中方案。介质滤波器广泛地应用于无线和卫星通信中，且介质材料特性的持续改善预示着这一技术将会有更大的应用空间。

第 17 章讨论了均衡器全通网络的分析和综合方法。这种在滤波器外接全通均衡器网络的方法可以提高滤波器网络的相位和时延特性。本章末讨论了线性相位滤波器和在滤波器外接均衡器的滤波网络的折中方案。

第 18 章讨论了广泛应用的多工网络的设计和折中方案。本章开篇讨论了各种不同的多工网络的折中方案，包括环形器耦合、混合电桥耦合和多枝节耦合等多工器，其中用到的是单模或双模滤波器，或是基于定向滤波器的多工器。接下来详细论述了各种多工器设计中应该注意的一些因素，并针对目前最复杂的微波网络——多枝节耦合多工器的设计方法和优化策略进行了深

入讨论,运用数值算例和图形来说明该设计方法。本章末简要论述了蜂窝通信应用中双工器的高功率容量问题。

第19章主要讨论了微波滤波器的计算机辅助调试方法。从理论上讲,一个微波滤波器的物理结构能够通过基于电磁方法以任意精度来诠释。然而在实际中,应用电磁仿真工具可能非常耗时,对于高阶的滤波器或多工器仿真无法进行下去。另外,由于加工的误差和材料特性的变化,实际微波滤波器响应与理想设计相比,可能会有所不同。以上这些问题,在对滤波器性能要求极高的无线和卫星通信系统中,其结果可能会更糟糕。因此,滤波器调试被认为是产品加工完成后不可或缺的一个步骤。本章讨论的一些方法包括:

1. 针对耦合滤波器的逐阶调试;
2. 基于电路模型参数提取的计算机辅助调试;
3. 应用输入反射系数的零极点的计算机辅助调试;
4. 时域调试;
5. 模糊逻辑调试。

本章针对每种方法的优势都进行了介绍。

第20章讨论了在设计微波滤波器和多工器中的高功率容量问题。本章回顾了陆地上应用的空气击穿现象,重点强调了严重影响高功率设备性能的一些因素,深入讨论了在太空应用中的二次电子倍增击穿现象,详细阐述了设备上高功率器件的设计余量问题,强调了避免二次电子倍增击穿现象的一些方法。高功率器件设计中的另一个重要现象是无源互调。无源互调比较难以分析,它取决于材料的选择和制造工艺的标准。本章给出了一些在高功率器件的设计中无源互调最小化的一些指导性建议。

本书不仅适用于高年级本科生和研究生,而且还适用于从事微波技术的人员。在编写这本书的过程中,我们借鉴了许多经验,包括实际的工程经验,在大学授课和做研讨会报告时获得的经验,在不同会议中与工程师们交流时获得的经验等。本书反映了作者为了提高微波滤波器和多工网络的技术水平所付出的毕生努力。

致 谢

作者有幸在 COM DEV 公司与很多非常敬业、才华横溢的同事共事多年，受益匪浅，对于他们给予的帮助我们非常感谢。特别是 COM DEV 公司的共同创立者 Val O'Donovan 博士。在他的领导和鼓励下，创造了一个良好环境，使我们可以和许多人一起，为了推动微波技术的发展做出自己的贡献。

我们想要感谢许多对这本书的编写有帮助的人：ESA 的 Dietmar Schmitt 和 COM DEV 的于明在书出版之前提出了许多宝贵的建议；Alastair Malarky（原 COM DEV 同事）对第 1 章提出了批评意见；Santiago Cogollos（Valencia 大学），Soren Peik（Applied Sciences Bremen 大学）及 Michael Earle（顾问）针对章节选择方面提供了反馈意见；同时我们也要感谢加拿大滑铁卢大学电子和计算机系的许多研究生在这本书的编写过程中提供的反馈信息和帮助。我们特别希望感谢的是 Michel Elnagger, Vahid Miraftab, Hamid Salehi, Joe Salfi, George Shaker 和 Winter Yan。我们的感谢还要送给那些行政管理人员，他们帮忙处理了大量与该书有关的工作，特别是滑铁卢大学的 Louise Green 和 Bill Jolley，COM DEV 公司的 Emma Shanks，以及 AMI 公司的 Rosaline Wong。

作者非常幸运地结识了许多在国家和国际卫星项目中的工程师。我们很高兴，也很感激许多同事及其他人能将卫星通信和移动通信产业领域拥有的广泛经验和技术水平引入该书。

目 录

第 1 章 射频滤波器——无线通信网络系统概论	1
1.1 通信系统模型	1
1.1.1 通信系统的组成	2
1.2 无线频谱及其应用	4
1.2.1 微波频率下的无线传播	4
1.2.2 作为自然资源的无线频谱	5
1.3 信息论的概念	6
1.4 通信信道与链路预算	8
1.4.1 通信链路中的信号功率	8
1.4.2 发射天线与接收天线	8
1.5 通信系统中的噪声	11
1.5.1 邻近同极化信道干扰	12
1.5.2 邻近交叉极化信道干扰	12
1.5.3 多路径干扰	12
1.5.4 热噪声	13
1.5.5 级联网络中的噪声	17
1.5.6 互调噪声	19
1.5.7 非理想信道的失真	20
1.5.8 射频链路设计	22
1.6 通信系统中的调制和解调方案	24
1.6.1 幅度调制	24
1.6.2 基带信号的组成	25
1.6.3 角调制信号	26
1.6.4 频率调制系统和幅度调制系统的对比	28
1.7 数字传输	29
1.7.1 抽样	30
1.7.2 量化	30
1.7.3 脉冲编码调制系统	30
1.7.4 脉冲编码调制系统的量化噪声	31
1.7.5 二进制传输中的误码率	31
1.7.6 数字调制和解调方案	33
1.7.7 高级调制方案	34
1.7.8 服务质量和信噪比	37
1.8 卫星系统的通信信道	37
1.8.1 接收部分	39
1.8.2 信道器部分	40
1.8.3 高功率放大器	41

1.8.4	发射机部分的架构	43
1.9	蜂窝系统中的射频滤波器	46
1.10	系统需求对射频滤波器指标的影响	47
1.11	卫星和蜂窝通信对滤波器技术的影响	49
1.12	小结	50
1.13	参考文献	50
附录 1A	互调失真小结	51
第 2 章	电路理论基础——近似法	52
2.1	线性系统	52
2.1.1	线性的概念	52
2.2	系统的分类	53
2.2.1	时变系统和时不变系统	53
2.2.2	集总参数系统和分布参数系统	53
2.2.3	即时系统和动态系统	53
2.2.4	模拟系统和数字系统	53
2.3	电路理论的历史演化	53
2.3.1	电路元件	54
2.4	线性系统在时域中的网络方程	54
2.5	频域指数驱动函数的线性系统网络方程	55
2.5.1	复频率变量	56
2.5.2	传输函数	57
2.5.3	连续指数的信号表示	57
2.5.4	电路网络的传输函数	58
2.6	线性系统对正弦激励的稳态响应	58
2.7	电路理论近似法	59
2.8	小结	60
2.9	参考文献	60
第 3 章	无耗低通原型滤波器函数特性	61
3.1	理想滤波器	61
3.1.1	无失真传输	61
3.1.2	二端口网络的最大传输功率	62
3.2	双终端无耗低通原型滤波器网络的多项式函数特性	62
3.2.1	反射和传输系数	63
3.2.2	特征多项式的归一化	65
3.3	理想低通原型网络的特征多项式	65
3.4	低通原型的特性	66
3.4.1	幅度响应	66
3.4.2	相位响应	67
3.4.3	相位的线性度	68
3.5	不同响应波形的特征多项式	68
3.5.1	全极点原型滤波器函数	68

3.5.2	包含有限传输零点的原型滤波器函数	69
3.6	经典原型滤波器	69
3.6.1	最大平坦滤波器	69
3.6.2	切比雪夫滤波器	70
3.6.3	椭圆函数滤波器	71
3.6.4	奇数阶椭圆函数滤波器	73
3.6.5	偶数阶椭圆函数滤波器	74
3.6.6	包含传输零点和最大平坦通带的滤波器	75
3.6.7	线性相位滤波器	75
3.6.8	最大平坦、切比雪夫和椭圆函数滤波器的比较	76
3.7	通用设计表(UDC)	76
3.7.1	波纹因子	77
3.8	低通原型电路结构	78
3.8.1	原型网络的变换	79
3.8.2	变换后的滤波器频率响应	80
3.9	滤波器的损耗影响	81
3.9.1	损耗因子 δ 与品质因数 Q_0 的关系	82
3.9.2	低通和高通滤波器的等效 δ	83
3.9.3	带通和带阻滤波器的等效 δ	84
3.10	不对称响应滤波器	85
3.10.1	正函数	85
3.11	小结	88
3.12	参考文献	88
附录3A	通用设计表	89
第4章	特征多项式的计算机辅助综合	94
4.1	对称低通原型滤波器网络的目标函数和约束条件	94
4.2	目标函数的解析梯度	95
4.2.1	无约束目标函数的梯度	96
4.2.2	不等式约束条件的梯度	97
4.2.3	等式约束条件的梯度	97
4.3	经典滤波器的优化准则	98
4.3.1	切比雪夫函数滤波器	98
4.3.2	反切比雪夫滤波器	98
4.3.3	椭圆函数滤波器	99
4.4	新型滤波器函数的生成	99
4.4.1	等波纹通带和阻带	99
4.4.2	非等波纹阻带和等波纹通带	100
4.5	不对称滤波器	100
4.5.1	切比雪夫通带的不对称滤波器	101
4.5.2	任意响应的不对称滤波器	102
4.6	线性相位滤波器	103

4.7	滤波器函数的关键频率	104
4.8	小结	104
4.9	参考文献	104
附录 4A	一个特殊的八阶滤波器的关键频率	105
第 5 章	多端口微波网络的分析	106
5.1	二端口网络的矩阵表示法	106
5.1.1	阻抗矩阵 $[Z]$ 和导纳矩阵 $[Y]$	106
5.1.2	$[ABCD]$ 矩阵	107
5.1.3	散射矩阵 $[S]$	109
5.1.4	传输矩阵 $[T]$	112
5.1.5	二端口网络的分析	115
5.2	两个网络的级联	116
5.3	多端口网络	122
5.4	多端口网络的分析	123
5.5	小结	127
5.6	参考文献	127
第 6 章	广义切比雪夫滤波器函数的综合	128
6.1	二端口网络传输参数 $S_{21}(s)$ 和反射参数 $S_{11}(s)$ 的多项式形式	128
6.1.1	ε 和 ε_R 的关系	133
6.2	确定分母多项式 $E(s)$ 的交替极点方法	133
6.3	广义切比雪夫滤波器函数多项式的综合方法	135
6.3.1	多项式的综合	136
6.3.2	递归技术	139
6.3.3	对称与不对称滤波器函数的多项式形式	142
6.4	预失真滤波器特性	143
6.4.1	预失真滤波器网络综合	146
6.5	双通带滤波器变换	149
6.6	小结	151
6.7	参考文献	151
第 7 章	电路网络综合方法	152
7.1	电路综合方法	153
7.1.1	三阶网络的 $[ABCD]$ 矩阵构造	154
7.1.2	网络综合	154
7.2	耦合谐振微波带通滤波器的低通原型电路	157
7.2.1	变换器电路的 $[ABCD]$ 多项式综合	158
7.2.2	单终端滤波器原型的 $[ABCD]$ 多项式综合	162
7.3	梯形网络的综合	164
7.4	(4-2)不对称滤波器网络综合实例	170
7.5	小结	175
7.6	参考文献	176

第 8 章	滤波器网络的耦合矩阵综合	177
8.1	耦合矩阵	177
8.1.1	低通和带通原型	178
8.1.2	一般 $N \times N$ 耦合矩阵形式的电路分析	179
8.1.3	低通原型电路的耦合矩阵构成	181
8.1.4	耦合矩阵形式的网络分析	183
8.1.5	直接分析	184
8.2	耦合矩阵的直接综合	185
8.2.1	$N \times N$ 耦合矩阵的直接综合	186
8.3	耦合矩阵的简化	187
8.3.1	相似变换和矩阵元素消元	188
8.4	$N+2$ 耦合矩阵的综合	193
8.4.1	横向耦合矩阵的综合	193
8.4.2	$N+2$ 横向耦合矩阵到规范折叠形矩阵的简化	197
8.4.3	实用范例	198
8.5	小结	201
8.6	参考文献	201
第 9 章	折叠耦合矩阵的拓扑重构	203
9.1	双模滤波器的对称实现	203
9.1.1	六阶滤波器	205
9.1.2	八阶滤波器	205
9.1.3	十阶滤波器	206
9.1.4	十二阶滤波器	206
9.2	对称响应的不对称实现	207
9.3	Pfitzenmaier 结构	208
9.4	级联四角元件——八阶及以上级联的两个四角元件	210
9.5	并联二端口网络	212
9.5.1	偶模和奇模耦合子矩阵	214
9.6	闭端形拓扑结构	215
9.6.1	闭端形拓扑的扩展形式	218
9.6.2	灵敏度分析	221
9.7	小结	222
9.8	参考文献	222
第 10 章	提取极点和三角元件的综合与应用	223
10.1	提取极点滤波器的综合	223
10.1.1	提取极点元件的综合	223
10.1.2	提取极点综合实例	226
10.1.3	提取极点滤波器网络的分析	229
10.1.4	直接耦合提取极点滤波器	229
10.2	带阻滤波器的提取极点综合方法	234
10.2.1	直接耦合带阻滤波器	235

10.3	三角元件	239
10.3.1	三角元件的电路综合方法	239
10.3.2	级联三角元件——耦合矩阵方法	243
10.3.3	基于三角元件的高级电路综合方法	248
10.4	盒形和扩展盒形结构	253
10.4.1	盒形拓扑结构	253
10.4.2	扩展盒形拓扑结构	256
10.5	小结	259
10.6	参考文献	260
第 11 章	微波谐振器	261
11.1	微波谐振器结构	261
11.2	谐振频率计算	263
11.2.1	常规传输线谐振器的谐振频率	263
11.2.2	计算谐振频率的横向谐振方法	264
11.2.3	任意外形谐振器的谐振频率	265
11.3	谐振器的无载 Q 值	267
11.3.1	常规谐振器的无载 Q 值	268
11.3.2	任意外形谐振器的无载 Q 值	270
11.4	有载和无载 Q 值的测量	270
11.5	小结	275
11.6	参考文献	275
第 12 章	波导与同轴低通滤波器	277
12.1	公比线元件	277
12.2	低通原型传输多项式	278
12.2.1	第二类切比雪夫多项式	278
12.2.2	Achieser-Zolotarev 函数	280
12.3	分布阶梯阻抗低通滤波器的综合实现	282
12.3.1	ω 平面到 θ 平面的传输函数 S_{21} 的映射	282
12.3.2	阶梯阻抗低通原型电路的综合	284
12.3.3	实现	286
12.4	短阶变换器	289
12.5	混合集总/分布参数低通滤波器的综合与实现	291
12.5.1	传输和反射多项式的构成	291
12.5.2	皱折低通原型电路综合	293
12.5.3	应用	295
12.6	小结	301
12.7	参考文献	301
第 13 章	单模和双模波导滤波器	303
13.1	滤波器综合过程	303
13.2	滤波器函数设计	304
13.2.1	幅度优化	304