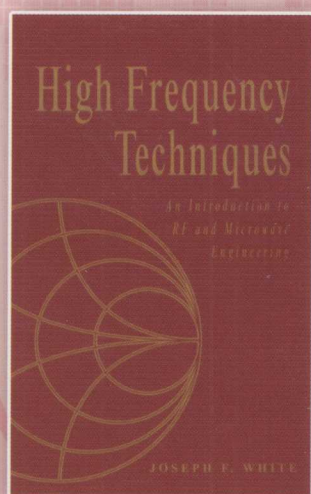


国外电子与通信教材系列



# 射频与微波 工程实践导论

**High Frequency Techniques:**  
**An Introduction to RF and Microwave Engineering**



[美] Joseph F. White 著

李秀萍 高建军 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

# 射频与微波工程实践导论

High Frequency Techniques:  
An Introduction to RF and Microwave Engineering

[美] Joseph F. White 著

李秀萍 高建军 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从回顾交流分析开始,介绍了谐振腔、Q定义及基于Q的阻抗匹配,在此基础上介绍了分布电路设计,并逐步引入对史密斯圆图的介绍及其深入应用,微波网络常用矩阵,电磁场理论,然后结合计算机仿真软件介绍了滤波器、耦合器及晶体管放大器设计。各章结尾提供了一定数量的习题,有利于进一步了解设计的原理和方法,增强动手能力,加深对概念的理解。

本书既可作为高等院校的本科生和研究生教材,供电子与计算机工程、电磁场与微波技术、电路与系统、电子信息专业使用,也是一本不可多得的技术参考书。

High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Engineering

Joseph F. White

Copyright © 2004 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, Inc., NEW YORK, CHICHESTER, BRISBANE, SINGAPORE AND TORONTO.

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

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司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。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2007-2064

### 图书在版编目(CIP)数据

射频与微波工程实践导论 / (美)怀特(White, J. F.)著;李秀萍,高建军译.

北京:电子工业出版社,2009.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Engineering

ISBN 978-7-121-07594-0

I. 射… II. ①怀… ②李… ③高… III. ①射频-技术-教材 ②微波技术-教材 IV. TN015

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第165245号

策划编辑:马 岚

责任编辑:余 义

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂  
装 订:

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: 24.5 字数: 627千字

印 次: 2009年1月第1次印刷

定 价: 45.00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。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

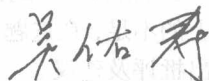
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老教师和专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社



## 教材出版委员会

- |     |     |   |
|-----|-----|---|
| 主任  | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授  |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师   |
|     | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长<br>中国通信学会常务理事、博士生导师                                    |
| 委员  | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员                 |
|     | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任   |
|     | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师<br>中国通信学会理事、IEEE 会士  |
|     | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师  |
|     | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员                                 |
|     | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师<br>计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长<br>国务院学位委员会学科评议组成员                   |
|     | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员<br>中国电子学会常务理事 |
|     | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员                                   |
|     | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员                            |
|     | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员                   |
|     | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员                        |
|     | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任   |
|     | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师  |
|     | 刘彩  | 中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工<br>信息产业部通信科技委副主任   |
|     | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长   |
|     | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长<br>教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员                    |
|     | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长  |
|     | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长  |

## 译者序

Joseph F. White博士是IEEE会士,在射频微波研究领域有着世界级的贡献。他编著的*High Frequency Technology — An Introduction to RF and Microwave Engineering*是一本适用于高年级本科生和研究生使用的教材或者参考书。本书可以作为国内电磁场与微波技术、电子与计算机工程、通信工程、电路与系统、电子信息及相关专业的本科生或者研究生教材。

在电子工业出版社的大力支持下,鉴于以下理由,我们选择翻译本书。

1. 本书从低频电路过渡到射频微波领域比较通俗易懂。大多数微波工程教材起始于电磁场理论和传输线理论,学生初学起来比较费劲,难以理解。本书从交流分析过渡,逐步深入“路”和“场”的概念,“集总”和“分布”参数的概念,这在章节的自然过渡中清晰明了。
2. 本书从交流分析和网络仿真开始,介绍了LC谐振和匹配网络,在此基础上进行分布电路设计,然后深入介绍了史密斯圆图及电磁场与波。实际的器件和电路设计包括定向耦合器、滤波器和晶体放大器。书中给出了具体的结合计算机的设计方法、详尽的分析,以及结合实际应用的注意事项。作者具有在射频微波领域学术界和工业界中科研和教学的工作经验。本书的风格强调基本概念,强调整理,以及强调实际工程中的设计和计算。每章结尾提供的习题,有利于进一步了解设计的原理和方法,增强动手能力,加深对概念的理解。
3. 本书结合计算机设计的例子具体且翔实,学生可以很快上手并产生兴趣。该书把复杂的问题简单化,生动清楚,内容详尽,并且启发性强。

全书共分10章,其中第1~7章是结合具体实例的理论分析,通过结合计算机仿真,微波常用概念变得简明易懂,可作为本科生教材的讲课重点,也是射频微波设计的理论基础;第8~10章给出了完整具体的结合计算机设计的实例。该书可作为研究生教材,便于培养学生的器件设计和实际操作能力。

北京邮电大学射频研究实验室的研究生徐志枢、章理、郑洋、应荧莹、王惠生、徐晓宁、杜挺、谭娟娟、杨燕、彭志艺及廖剑锃等,参与了大量文字录入工作和校对工作,在此表示衷心的感谢!

本书的翻译得到“十一五”国家高技术研究发展计划(863计划)2006AA04A102和国家自然科学基金(60671054)的资助,在此表示特别感谢!由于译者水平有限,书中难免译词不妥。疏误之处,敬请读者不吝指正。译者感谢电子工业出版社对本书翻译工作的大力支持。

李秀萍 于北京  
2008-8-31

# 前 言

本书是针对有志成为射频微波工程师的大学本科或研究生而写的。当今的工程师必须熟练地运用计算机作为设计工具，以保持竞争力。本书假定学生可以使用计算机和网络仿真软件，当然即使没有，也可以使用本书。无论哪种情况，该书都为学生准备了把计算机当成日常工具的现代工程环境。

计算机的应用可分为两个方面。第一个是让计算机按设定的程序和电路元件参数完成复杂的计算，这是网络仿真的主要应用，以此来贯穿整本书中给出的每个网络是如何在整个频段工作的。第二个用途和第一个类似，除此之外，还给出了用计算机改变部件的参数值，以达到一个预期的目标性能（优化），或者给出当构成一定量电路的器件值从一个量变化到另一个量的时候，其性能的变化（产量估计）。

在第二种应用中，计算机就像曾经假设的一千只猴子那样，如果教会它们打字的话，它们最终能输入世界上所有的文学作品甚至包括其索引。但是，进一步假设，它也会输入每一个可能的错误版本，也包括错误的索引在内。如今，工程师的任务就是在理解根本原理的基础上得到计算机输出结果中有用的部分。从这个意思上看，计算机只是一个被用做设计的工具，而不能替代设计。本书强调基本概念、工程技术，以及把计算机作为常规和智能的计算机辅助工具。

通过理论材料的呈现和计算机生成的例子，能提供对带宽、射频微波网络加工产量等基本性能的深入理解。这促进了经典电路设计及其局限性的评估。但是，在当今工程领域，经典电路设计很少有标准格式，尽管这是在使用个人计算机和仿真软件之前的必要练习。而且，如今的经典设计是满足针对某种特定设计指标所需的特定设计的切入点。经典设计的存在仍然有其重要的意义，因为它是定义什么是可期望的合理的仿真优化目标规格的出发点。它让这一千只猴子有效地从正确的那一页开始工作。

本书包括了无线电历史，以及对复数、交变电流理论和分贝的对数基础等工程基础的回顾。所有章节都采用简单通俗的方式，以利于读者理解所呈现的概念。书中没有给出许多可以找到的中间步骤，因为其目的在于启发，而不是也不需要测试读者的数学能力。本书还包括一些没有唯一答案的习题。对于习题，需要在本书的基础上进行更深层次的思考，这也正是意图所在。这样做可以把实际工程领域所发生的问题介绍给读者。

需要告诫读者的是，不要认为本书回顾的材料通俗易懂，就认为缺乏概念的严格性和完整性。读者将会很快看到，本书的章节实际上比那些大部分介绍微波的书本包含更多的理论概念和先进的工程技术。当然，该书重点强调实用技术。比如说，读者会惊喜地发现，仅仅在品质因数  $Q$  和阻抗导纳之间复杂的数学关系的基础上，就发展起来一门称为  $Q$  匹配的技术。熟悉该项技术的工程专家屈指可数。

本书的重点是如何解决实际工程环境中碰到的设计难题。像分布滤波器那样的设计，最好通过拥有的软件程序实现，或者通过那一千只猴子的方法实现（优化），但是重点是给猴子一个正确的起始点。



本书的风格来自于作者曾经教过的一门工业实验课程。在这门课程中，学生们在计算机上构造所介绍的相关电路，按规格设计好并且检验它们随频率的变化。这种方法能很快地培养学生设计方面的信心。通过实践这种练习方法，我们用网络仿真来揭示电路的特性，并了解了学生们的掌握情况。下面的段落总结了所包含的主要议题。

第1章是无线电传输起源的回顾。Guglielmo Marconi在无线电发展的过程中起步最早，其持之以恒的努力仍然鼓舞着当今的工程师。

第2章是工程回顾，包括利用复杂的符号（见附录B）进行交流电分析，阻抗，分贝、毫瓦分贝及瓦分贝的量度，其目的是巩固这些基本概念。直觉上熟悉这些基础知识，对射频微波工程师来说，就像打字机对高效的写作一样重要。本章介绍了电路元件的实际应用，包括电阻器、电感器、电容器及其包含的寄生元件的等效电路。这些元件的寄生电抗严重限制了它们在高频段的使用，因此工程师有必要了解这些限制，以及它们是如何产生的。

第3章讨论的是谐振器和 $Q$ 因子对其带宽的影响。基于电抗和电阻的比值的 $Q$ 及串并联阻抗转换，得出了 $Q$ 匹配方案。这让工程师们能够以一种更简单易记的步骤来设计LC匹配网络。

第4章在基于传输线及其特性的基础上介绍了分布电路。这是微波设计理论的开始。引入了一些重要的概念，比如，波长、电压驻波比（VSWR）、反射系数、回波损耗、失配损耗和失配误差等。紧接着介绍的是开槽线测量、电报方程和传输线方程的推导。还介绍了相位和群速度的概念，以及与阻抗和分布匹配相关的反射系数。导出了传输线阻抗转换方程和一些特殊情况的简单应用。介绍了Fano极限，这是在一定频带上对匹配能力的重要限制，可通过反射系数推导得到。

第5章主要是介绍史密斯（Smith）圆图基础及其应用，这是成为微波工程师的必要条件。史密斯圆图提供了一个观察传输线工作的窗口，把复杂的阻抗转换通过清晰易理解的方式表现在一个简单的图表上。本章揭示了史密斯圆图是如何处理基于无损传输线上恒定幅度反射系数的阻抗变换的。史密斯圆图只不过是反射系数圆，这是常被忽略的原理。本章还给出了利用阻抗圆、导纳圆、反射系数圆、 $Q$ 因子圆推导出史密斯圆图的方法。举例说明了复负载阻抗匹配技术，电压驻波比带宽估计，以及等效电路导出技术。

第6章介绍了矩阵代数和 $ABCD$ ， $Z$ ， $Y$ ， $S$ ， $T$ 矩阵的定义。矩阵的使用可以追溯至大多数电路的导出和测量技术。这一章举例说明了何时与如何使用不同的矩阵及其局限性。例如，书中给出了如何用 $ABCD$ 矩阵，在几步内得到一个常规的等效电路，如得到传输线及完全匹配、可变的衰减器的集总等效电路。

第7章是根据微波射频工程师的需求，对电磁场理论进行的一个广泛介绍，它始于麦克斯韦方程组的物理和定性的实验，整章中很多基本原理的推导都用到了这几个方程。这包括著名的波动方程，从中麦克斯韦最先推导出了光和电磁场的一致性。

在整本书中，有必需技术的介绍。这一章中更是如此。介绍了在描述电磁场属性和关系的时候需要用到的矢量代数，其中包括梯度、点乘、叉乘、散度、旋度和拉普拉斯算子。这些矢量运算的直接应用有助于了解其物理意义，以及用它们来描述电磁场关系。

第7章的深度对一本入门书籍来说是很少见的。它从最基础的概念出发，延伸至很先进的应用。从数学角度详细地介绍了趋肤效应、导体的特征阻抗、坡印亭（Poynting）定理、波的

极化、同轴传输线和矩形波导传播场的导出、傅里叶 (Fourier) 级数和格林 (Green) 函数、电路中的高阶模式、矢量电势、天线, 以及无线电系统中的路径损耗。

即便在最理想的条件下, 场的理论都很难掌握。为了适应电磁理论的宽范围, 数学推导难以完整, 其中忽略了很多对高效率阅读和快速理解定理所必需的中间步骤。

第7章总结了执行分布电路电磁场仿真中计算机的重要应用。这体现在它提供了比传统的、理想的分布模型更高的设计精度。

第8章论述的是定向耦合器, 它是微波测量和微波系统中重要的组成部分。在这一章中, 给出了如何分析和应用耦合器。书中以反向波耦合器分析为例介绍了偶数模式和奇数模式的分析方法。这样利用一种令人惊叹的器件来描述奇偶模分析的结果, 很难在除此之外的其他参考书中体现得如此全面。反向波耦合器可以完全匹配, 无限隔离, 以及在所有频率下进行精确的  $90^\circ$  相位分离。还给出了将 Cohn 凹角几何结构用于获得 3 dB 反向波和 5 : 1 带宽耦合器。本章还讨论了将耦合器用做功率分配器、网络反向移相器和作为网络分析仪的阻抗测量元件。

第9章给读者展示了如何从低通原型开始设计具有最平坦特性 [ 巴特沃思 (Butterworth) ]、等波纹 [ 切比雪夫 (Chebyshev) ] 和接近常数延迟 [ 贝塞尔 (Bessel) ] 特性的滤波器。本章提供了以此标尺来设计高通、带通、带阻滤波器的经典技术。论证了滤波器  $Q$  值对插入损耗的影响, 介绍了含等阻带波纹的椭圆滤波器。将利用顶耦合的等谐振腔滤波器描述成为一种扩展集总元件设计在实际频带中的工具。

通过半波传输线谐振器引入分布滤波器。展示了 Richards 转换和 Kuroda 等效, 将其作为把集总元件设计转化成分布滤波器的工具。Mumford 的  $1/4$  波长枝节滤波器作为仿真软件中优化等波纹滤波器和其他带通滤波器的基础。Kuroda 等效不再是按惯例的概念模糊的“单元部件”, 而是根据传输线的方式引入, 简化了其使用。这允许学生们迅速理解并使用 Kuroda 等效, 甚至可以把它证明当做习题。

第9章以滤波器电路为例, 总结了对产品产量的处理, 利用特殊的方法如高斯积分、正态曲线展示如何用“ $1\sigma$ ”规格确定元件和电路的产量。介绍了用网络仿真评估实际的滤波器电路的产量。在这个过程中, 应用于电路的规格及其性能分析, 是在假定其加工是由正态分布元件的随机抽样构成的 [ 蒙特卡罗 (Monte Carlo) 分析 ]。由 500 个电路得到的产量是确定的, 给出了元件容差和规格是如何影响产品常量的, 甚至在还没得到或者装备任何材料的时候就确定下来了。

第10章是晶体管放大器。放大器设计的关键是其稳定性和晶体管的源及负载的匹配, 而且必须在整个频率范围实现, 以及考虑整个频率范围内器件的增益。如果手动计算的话, 这会是一个繁重的计算任务。用  $S$  参数和网络仿真器作为设计工具进行处理, 在史密斯圆图上描述出恒定增益和噪声系数圆, 用实际晶体管参数论证了其设计用途。

所描述的主要设计方法包括, 单向增益、工作增益、资用增益、同时匹配和低噪声放大技术, 并通过可用的晶体管  $S$  参数进行了论证, 给出了特殊的放大器主题, 包括单向设计性能指标 (Unilateral Figure of Merit)、非线性效应、增益饱和、三阶交调截取 (Three-order Intercept)、非寄生动态范围 (SFDR) 和噪声容限。论证了级连放大器级间的驻波比的影响, 给出了采用负反馈来减轻级间驻波比的互扰, 设计出具有良好匹配的宽带放大器的方法。

本书包括如此多的理论和实践材料的目的是为了快速熟悉各种各样的电路,以及它们的容量、局限性和设计方法。这使得工程师不用再查阅繁杂的图书馆书籍就能直接进行实际电路的设计。本书举例说明这些主题并给出建议,如何只能利用计算机的优化以指挥计算机寻找具有实际可行性能的电路。

一个人可能在微波工程方面实践了多年也无法在如此宽泛的主题中获得经验。读完过这本书,并且完成了练习题的学生,以我的经验来说,通常都能胜任微波射频工程师的职位。

恳请读者提出建议和指出本书中的错误。

Joseph F. White  
jfwhite@ieee.org

## 致 谢

封面上的史密斯圆图标志的和书中用到的史密斯圆图得到了 Vnita Smith 的允许，他是 Analog Instrument 公司的老板，通信地址是 Box 950, New Providence, New Jersey 07974。很高兴能向小 Philip Smith 致谢，因为他发明了这个不可思议的工具，大概是对微波界最深刻的理解。很多史密斯圆图的匹配问题是通过 Noble Publishing 公司 (Norcross, Georgia 30071) 提供的 WinSmith 软件实现的。

所有的电路仿真都是由经 Randall Rhea 允许的 Genesys 软件来完成的，Randall Rhea 是 Eagleware 公司 (Norcross, Georgia 30071) 的创始人。同样，也谢谢 Eagleware 的在线支持团队，正是在他们的协助下改进了文中出现的很多仿真例子。

感谢鼓励我开始微波教学并且与我分享很多微波射频知识和设计方法的 Les Besser 博士。同样，也要谢谢 Gerald DiPiazza 的耐心，以及在书中临界场理论发展方面的帮助。

我非常感谢 Peter Rizzi 博士，他是我的大学同学和好朋友。他耐心地读完了手写稿，并且提出了很多提高可读性、实用性和准确性的建议。他直接执稿噪声和噪声温度部分。Rizzi 博士是 *Microwave Engineering* 和 *Passive Circuits* 的作者，本书很广泛地参考了这两本很重要的、普遍使用的实用手册。他是一个很受学生欢迎的微波老师。除了我，没有人能够正确地评价其贡献的重要性。

写过书的人都知道这对爱人的耐心是很大的考验。谢谢我的妻子 Eloise。

## 关于作者

Joseph White 是射频微波方面的老师兼顾问，在无线电产业界也非常有名。

他从事物理电子学专业，获得 Case Institute of Technology 大学电子及电机工程学士学位、Northeastern University 硕士学位，以及 Rensselaer Polytechnic Institute 电子工程系博士学位。White 博士在 Massachusetts 的 Burlington 的 M/A-COM 公司任半导体工程师达 25 年之久，拥有数项微波专利。

他发表了一篇文章 *Contributions to Phased Array Antennas*，因此被授予 IEEE 微波理论技术年度应用奖。

他写的 *Microwave Semiconductor Engineering* 一书自 1977 年以来已第 3 次印刷。

他教授的射频微波课程既有入门水平的，也有高级工程师水平的。他在美国和国际上做微波讲座已经有 30 多年。

20 多年来，他一直是微波杂志，包括 *Microwave Journal* 和 *Applied Microwave and Wireless* 的技术编辑。

他还是 IEEE 微波理论与技术的审稿人，IEEE 会士，也是 Eta Kappa Nu 和 Sigma Xi 的联谊会会员。

恳请指出书中的问题、错误，以及发表意见。请发电子邮件至 [jfwhite@ieee.org](mailto:jfwhite@ieee.org)。

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036



# 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 无线电起源 .....	1
1.2 当前无线电频谱 .....	4
1.3 本书约定 .....	7
1.4 矢量和坐标 .....	8
1.5 常量和有用变换 .....	10
参考文献 .....	10
第 2 章 交流分析和电路仿真 .....	12
2.1 基础电路元件 .....	12
2.2 基尔霍夫定律 .....	16
2.3 交流分析 .....	17
2.4 电压和电流相量 .....	19
2.5 阻抗 .....	20
2.6 导纳 .....	22
2.7 LLFPB 网络 .....	24
2.8 分贝、瓦分贝和毫瓦分贝 .....	24
2.9 功率转移 .....	28
2.10 损耗规定 .....	30
2.11 实际 $RLC$ 模型 .....	32
2.12 $LC$ 元件设计 .....	34
2.13 趋肤效应 .....	37
2.14 电路仿真 .....	39
参考文献 .....	42
习题 .....	42
第 3 章 $LC$ 谐振和匹配网络 .....	44
3.1 $LC$ 谐振 .....	44
3.2 串联电路品质因数 .....	45
3.3 并联电路品质因数 .....	46
3.4 耦合谐振腔 .....	47
3.5 $Q$ 匹配 .....	49
参考文献 .....	54
习题 .....	55

第4章 分布电路设计 .....	57
4.1 传输线 .....	57
4.2 介质中的波长 .....	59
4.3 传输线上的脉冲 .....	60
4.4 入射波与反射波 .....	61
4.5 反射系数 .....	61
4.6 回波损耗 .....	62
4.7 失配损耗 .....	62
4.8 失配误差 .....	63
4.9 电报方程 .....	66
4.10 传输线波方程 .....	67
4.11 波的传播 .....	68
4.12 相位和群速度 .....	70
4.13 反射系数与阻抗 .....	72
4.14 阻抗变换公式 .....	72
4.15 利用传输线的阻抗匹配 .....	78
4.16 FANO (和BODE) 约束条件 .....	78
参考文献 .....	82
习题 .....	83
第5章 史密斯圆图 .....	86
5.1 史密斯圆图基础 .....	86
5.2 绘制史密斯圆图 .....	89
5.3 史密斯圆图上的导纳 .....	94
5.4 失配负载调谐 .....	97
5.5 开槽线阻抗测量 .....	98
5.6 驻波比 $V_{SWR} = r$ .....	101
5.7 负电阻的史密斯圆图 .....	102
5.8 史密斯圆图导航 .....	103
5.9 史密斯圆图软件 .....	106
5.10 史密斯圆图上的带宽估计 .....	107
5.11 近似调谐或许更好 .....	108
5.12 史密斯圆图上的频率线 .....	109
5.13 在没有传输线的情况下使用史密斯圆图 .....	109
5.14 恒定 $Q$ 圆 .....	110
5.15 传输线的集总等效电路 .....	112
参考文献 .....	116
习题 .....	116

第 6 章 矩阵分析 .....	118
6.1 矩阵代数学 .....	118
6.2 $Z$ 矩阵与 $Y$ 矩阵 .....	120
6.3 互易性 .....	122
6.4 $ABCD$ 矩阵 .....	122
6.5 散射矩阵 .....	126
6.6 传输矩阵 .....	129
参考文献 .....	130
习题 .....	131
第 7 章 电磁场与波 .....	133
7.1 矢量力场 .....	133
7.2 电场和磁场 .....	134
7.3 电场强度 $E$ .....	135
7.4 磁通量密度 .....	136
7.5 矢量叉乘 .....	137
7.6 静电场和高斯定理 .....	140
7.7 矢量点乘与散度 .....	142
7.8 静电势函数与梯度 .....	143
7.9 磁场 $B$ 的散度 .....	146
7.10 安培定理 .....	146
7.11 矢量的旋度 .....	147
7.12 法拉第电磁感应定律 .....	152
7.13 麦克斯韦方程组 .....	153
7.14 基本的矢量运算 .....	156
7.15 拉普拉斯方程 .....	157
7.16 矢量与标量恒等式 .....	159
7.17 导体中的自由电荷 .....	160
7.18 趋肤效应 .....	162
7.19 导体的内阻抗 .....	164
7.20 波动方程 .....	166
7.21 亥姆霍兹方程 .....	167
7.22 平面传播波 .....	168
7.23 坡印亭定理 .....	170
7.24 波的极化 .....	172
7.25 传输线上的电场和磁场 .....	175
7.26 波导 .....	180
7.27 傅里叶级数与格林函数 .....	191
7.28 电路中的高阶模 .....	196

7.29	矢量位 .....	198
7.30	滞后位 .....	200
7.31	正弦信号情况下的位函数 .....	200
7.32	天线 .....	201
7.33	路径损耗 .....	212
7.34	电磁仿真 .....	214
	参考文献 .....	218
	习题 .....	219
<b>第 8 章</b>	<b>定向耦合器 .....</b>	<b>224</b>
8.1	与波长可比拟的尺寸 .....	224
8.2	反向波耦合器 .....	224
8.3	奇 - 偶模分析 .....	225
8.4	3 dB 反射终端耦合器 .....	233
8.5	耦合器规格 .....	236
8.6	使用定向耦合器的测量方法 .....	237
8.7	网络分析仪阻抗测量 .....	238
8.8	二端口散射参量测量 .....	238
8.9	分支线耦合器 .....	239
8.10	混合环形耦合器 .....	240
8.11	WILKINSON 功率分配器 .....	241
	参考文献 .....	242
	习题 .....	242
<b>第 9 章</b>	<b>滤波器设计 .....</b>	<b>245</b>
9.1	电压传输函数 .....	245
9.2	低通原型 .....	246
9.3	巴特沃思或最平特性滤波器 .....	247
9.4	反归一原型响应 .....	248
9.5	高通滤波器 .....	251
9.6	带通滤波器 .....	252
9.7	带阻滤波器 .....	255
9.8	切比雪夫滤波器 .....	257
9.9	相位和群时延 .....	260
9.10	滤波器 Q 值 .....	263
9.11	双工滤波器 .....	265
9.12	顶耦合的带通滤波器 .....	266
9.13	椭圆滤波器 .....	268
9.14	分布滤波器 .....	270
9.15	RICHARDS 变换 .....	272