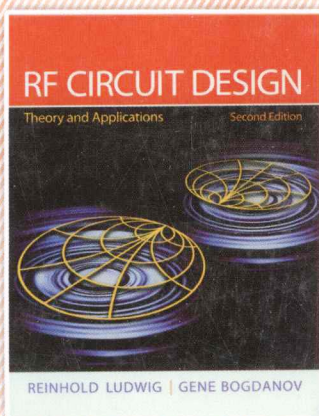


国外电子与通信教材系列

PEARSON

射频电路设计 ——理论与应用 (第二版)

RF Circuit Design
Theory and Applications, Second Edition



[美] Reinhold Ludwig 著
Gene Bogdanov

王子宇 王心悦 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

射频电路设计 ——理论与应用

(第二版)

RF Circuit Design
Theory and Applications

Second Edition

[美] Reinhold Ludwig 著
Gene Bogdanov

王子宇 王心悦 等译



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书从低频电路理论到射频、微波电路理论的演化过程出发,讨论以低频电路理论为基础结合高频电压、电流的波动特征来分析和设计射频、微波系统的方法——微波等效电路法,使不具备电磁场理论和微波技术背景的读者也能了解和掌握射频、微波电路的基本设计原则和方法。全书共10章,涵盖传输线、匹配网络、滤波器、混频器、放大器和振荡器等主要射频微波系统单元的理论分析和设计问题及电路分析工具(圆图、网络参量和信号流图)。书中例题非常有实用价值。全书大多数电路都经过 ADS 仿真,并提供标准 MATLAB 计算程序。

本书适合作为通信、电子类学科学生的射频电路设计课程用书,也适合工程技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled RF Circuit Design: Theory and Applications, Second Edition, 9780131471375 by Reinhold Ludwig, Gene Bogdanov, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2009 Pearson Education Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2013.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2008-2492

图书在版编目(CIP)数据

射频电路设计:理论与应用:第2版/(美)路德维格(Ludwig,R.), (美)波格丹诺夫(Bogdanov,G.)著;王子宇,王心悦等译. —北京:电子工业出版社,2013.8

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:RF Circuit Design: Theory and Applications, Second Edition

ISBN 978-7-121-08531-4

I. ①射… II. ①路… ②波… ③王… ④王… III. ①射频电路—电路设计—教材 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 039531 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:28.75 字数:736 千字

印 次:2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价:59.00 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 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,除了依靠高校的老师 and 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和自由组合使用。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”。

为做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 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 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 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 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 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 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 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 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 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 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 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 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 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 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 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

近年来,由于科学技术特别是通信技术(包括移动通信、卫星通信、光通信)和计算机技术的迅猛发展,电子系统的工作频率日益提高,射频和微波电路得到了空前广泛的应用。目前,国内外都严重缺乏从事射频和微波电路设计的专业人才,而且国内大专院校采用的微波教材多是从电磁场理论出发的,讨论波导系统的基本原理,极少涉及面向应用的各种射频和微波电路。电子工业出版社于2002年引进出版了本书第一版的中文版,受到了读者的热烈欢迎。鉴于上述原因,我们决定翻译出版《射频电路设计——理论与应用(第二版)》,并希望它能早日与读者见面。

本书第二版是Reinhold Ludwig教授和Gene Bogdanov根据其第一版修订出版的,是美国伍斯特技术学院(WPI)电气和计算机工程系的本科生和研究生教科书。

本书的主要特点是避开了经典电磁场理论方法,而采用微波等效电路方法讨论射频和微波电路的设计问题。这种方式的好处在于:只要读者具备基本的电路知识,就可以理解本书的内容,并掌握射频和微波电路的基本设计原则和方法。然而,必须说明的是:这种方法不涉及电磁场的空间分布特征——模式,因此只能分析并讨论工作在单模状态下的射频与微波电路及系统。

本书的另一个重要特点是面向实际应用,书中讲述的主要概念和方法都尽量通过具有实际应用价值的设计实例加以解释和说明,并以较大篇幅详细介绍了它们的求解方法,使读者能够举一反三,独立解决射频和微波电路设计中的实际问题。这也是我们希望将此书翻译出来介绍给国内读者的主要原因之一。

译者尽量使书中主要概念的名称与国内习惯相符,以免给读者造成不便。例如原文中的ABCD矩阵就译为在国内通常所说的A参量矩阵。

全书共分10章,由北京大学王子宇教授、王心悦讲师、李小寒研究员翻译和校对;Jenny Wang博士、Marc Thomas博士参与了译文的讨论和修改工作。本书使用或参考了北京大学张肇仪教授、徐承和教授等人在本书第一版中的相关译文。

由于译者水平所限,译文不妥之处在所难免,希望广大读者给予批评指正。

前 言

由于对射频及微波产品的大量需求，高频电路设计一直受到制造业的特别关注。新型的半导体器件，新型的板材及先进的制造技术，使大量生产高速数字系统和模拟系统成为可能，这对于无线通信、全球定位、雷达、遥感及相关的电气和计算机工程领域都产生了深远影响，也导致了训练有素的、具备高频电路设计理论知识的工程师和专家的市场需求。自从本书第一版于2000年1月出版以来，由于对训练有素的射频专家的需求急剧增加，目前出版关于高频电路基础的教科书仍是非常必要的。

本书第二版的目标仍然是：在尽量少涉及电磁场理论的情况下，介绍射频电路设计方面的基本概念及分布电路的基本理论。本书的写作风格是，读者不必掌握大学一年级物理课程中关于场和波之外的电磁场理论知识。掌握了基本电路理论和/或微电子学知识的学生与应用工程师，就能够阅读本书，并能够通过本书全面掌握高频电路原理，其中包括无源和有源分立器件、传输线、滤波器、放大器、混频器、振荡器及其设计步骤。烦琐的数学推导安排在附录或例题中，从而将枯燥的理论细节与正文分开。虽然忽略理论细节会在一定程度上影响分析的精确性，但却增加了本书的可读性，并突出了电路的基本原理。

本书第二版与第一版的区别何在？除了力图减少排版错误及不妥的内容之外，第二版在几个重要方面都有改进。首先，每章最后增加了应用讲座单元。在这些单元中，详细讨论了设计方法的关键点和测试步骤。介绍了诸如衰减器的构造，微带滤波器，以及对具有偏置网络和匹配网络的低噪声射频放大器的仿真方法等，就像在授课的同时附带做了实验。配备了相关仪器和仿真软件的读者，可根据应用讲座轻松地制作这些器件。其次，重要的内容、有用的定义，以及值得注意的现象，都作为旁注与正文区别开。除了要突出它们的重要性之外，这种方式使我们能强调并更好地解释那些不宜直接放入正文描述的问题。例如，锁相环系统的全面知识就超出了本书的讨论范围。然而，对锁相环的简要介绍使读者有了掌握高频电路理论内涵的线索和欲望。这将进一步激励读者自发探索有关问题。第三，更加注重非线性设计原理，特别是振荡器及其相关的谐振器。

为了向读者提供丰富的线性、非线性电路设计经验，我们在书中安排了大量的例题，这些例题相当详细地分析了各种设计方法的基本原理和难点，许多例题的篇幅甚至多达好几页。虽然线性散射参量的仿真方法在特定条件下是合理的，但更加完善的电路设计则需要非线性仿真方法，例如谐波平衡分析法。非线性电路仿真特别适合振荡器、混频器及放大器的设计。当然，仿真工具的功能、精度、计算速度甚至成本，都可能成为合理运用仿真工具必须考虑的问题。多年来，电路仿真软件和射频工具软件的功能一直在不断扩展。确实经常有人向本书作者咨询在特殊条件下具有独特性能的电路仿真软件。我们无意评估或推荐某个特定的电路仿真软件（对于所有电路仿真软件的供应商，本书作者与之既无商业的，也无技术方面的关系）。通常，专业的高频仿真软件非常昂贵，而且必须熟悉它们才能有效地利用。几年前，经过充分的评估，美国伍斯特技术学院的电气与计算机工程系决定采用安捷伦公司的先进设计系统（Advanced Design Systems, ADS）作为其研究生和本科生的首选高频电路仿真软件。正是

这个原因,以及 ADS 在工业界的广泛应用,书中大多数电路都是采用 ADS 仿真的。然而,对于无法得到专业仿真软件的读者,我们编写了大量的标准 MATLAB m 文件,可以从附录 I 所列出的网址下载。MATLAB 是非常流行而且价格相对低廉的数学工具,它可以分析本书中讨论的许多例题,并能迅速将结果用图形显示。特别是,在史密斯圆图上进行的阻抗变换计算一定能吸引读者。

由于本书的主要目标是通常的电路,所以有意略去了高频数字电路及编码与调制方面的内容。虽然这些内容都很重要,但需增加很多篇幅,这与本书计划在一到两个学期内讲完射频电路设计基础知识的初衷差距较大。在伍斯特技术学院的电气与计算机工程系,这样做并未产生不利影响,因为上述内容中的大多数都已在通信系统工程的专业课中讲授过了。

本书编排方式如下:

第 1 章概要解释了为什么随着工作频率的提高,当波长可与电路尺度相比拟时,基本电路理论必须进行修正。

第 2 章提出了分立电路理论的基本概念。

第 3 章引入作为通用工具的史密斯圆图,用于处理以反射系数为基础的周期性阻抗现象。

第 4 章介绍了网络和信号流图表示方法,以及如何利用所谓散射参量描述终端条件。

第 5 章将上述这些网络模型及其散射参量表达方式用于研究无源射频滤波器电路。

第 6 章为了讨论有源器件,回顾了一些与半导体器件有关的重要基础知识。

第 7 章给出了有源器件的电路模型。

第 8 章讨论了阻抗匹配,以及双极晶体管和场效应晶体管的偏置网络。

第 9 章的重点是一些重要的高频放大器电路及其在低噪声和高功率应用中的设计难点。

第 10 章介绍了非线性系统及其设计方法,包括振荡器和混频器电路。

本书是伍斯特技术学院电气与计算机工程系的标准课时为 7 周(每周 5 课时)的射频电路设计(电气与计算机工程系 3113,射频电路设计基础)课程的指定教科书。该课程的主要对象是具有微电子学基础的本科三四年级学生。本课程不包括附加的实验,但总共向学生介绍了 6 个实用电路(所有应用讲座),引导学生自己利用网络分析仪进行测试。另外,ADS 仿真并不作为正规授课内容的一部分。^① 本书的各章都是相对独立的,目的是为了能灵活地安排课程的内容。在伍斯特技术学院,大约 3 学期课时的内容被压缩在 7 周内讲授(共 28 ~ 29 次课)。电气与计算机工程系的讲授内容如下表所示。

EE 3113 射频电路设计基础

第 1 章 引言	1.1 节 ~ 1.6 节
第 2 章 传输线理论	2.1 节 ~ 2.12 节
第 3 章 史密斯圆图	3.1 节 ~ 3.5 节
第 4 章 单端口网络和多端口网络	4.1 节 ~ 4.5 节
第 7 章 射频有源器件模型	7.1 节 ~ 7.2 节
第 8 章 匹配网络和偏置网络	8.1 节 ~ 8.4 节
第 9 章 射频晶体管放大器设计	9.1 节 ~ 9.4 节

^① 教材配套网站为 http://ece.wpi.edu/RF_Circuit_Design。

其余内容则在第2学期(7周)讲授,其中包括更深入的内容,诸如微波滤波器、等效电路模型、振荡器和混频器。授课内容安排见下表。

高级射频电路设计方法

第5章 射频滤波器设计	5.1节~5.5节
第6章 射频有源器件	6.1节~6.6节
第7章 射频有源器件模型	7.3节~7.5节
第9章 射频晶体管放大器设计	9.5节~9.8节
第10章 振荡器和混频器	10.1节~10.4节

显然,整个课程的安排仍需根据总课时、学生的基础及其他相关课程的进度来安排。撰写本书时,学校正在规划一个新的研究生课程,该课程将包括本书第5章至第10章的射频电路内容,以及研究生传统的电磁场理论课程。

致 谢

作者感谢一起工作的各位同事、学生和实验操作工程师。感谢电气和计算机工程系主任 Fred Looft 教授为网络版 ADS 仿真资源和最新配备的网络分析仪提供的系主任基金。我们感谢 NXP 公司(前飞利浦半导体)的 Korné Vennema 和 Scott Blum 提供的射频专业技术支持,给予的学生课题资助,以及在测量仪器方面提供的帮助。感谢 Sergey N. Makarov 教授通过学术讨论给予的技术支持。Brian Foley, Peter Serano, Shaileshkumar Raval, Rostislav Lemdiasov 博士, Aghogho Obi, Souheil Benzerrouk 和 Funan Shi 博士是在读的或已毕业的研究生,他们非常赞赏伍斯特技术学院图像与遥感中心(Center for Imaging and Sensing, CIS)的学术环境和给予的支持,并提出了一些有见解的崭新观点。特别要感谢伍斯特技术学院金属处理研究院院长 Diran Apelian 教授和通用汽车公司(GM)的 Scott Biederman 为作者介绍了微波成像的重要意义,以及用射频进行材料处理的机理。Reinhold Ludwig 感谢本书第一版的合作者 Pavel Bretchko 博士,他的杰出贡献和辛勤工作促成了本书的第一版,并奠定了第二版的基础。感谢本书第一版的策划出版人 Tom Robbins 在过去 7 年中给予的一贯支持和文字编辑方面的建议。学术出版业正是依靠像 Robbins 先生这样的专家才得以延续发展。

感谢 Prentice Hall 的工作人员,特别是 Alice Dworkin, Rose Kernan 及印度钦奈 Laserwords 私人有限公司的资深项目经理 G. Muthukumar 为本书的出版所给予的支持。

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 射频电路设计的重要性	1
1.2 量纲和单位	5
1.3 频谱	7
1.4 无源元件的射频特性	8
1.5 贴片元件及电路板	17
1.6 射频电路制作方法	20
应用讲座：线圈电感的测量	21
1.7 小结	22
阅读文献	23
习题	23
第 2 章 传输线理论	28
2.1 传输线理论的实质	28
2.2 传输线实例	30
2.3 等效电路模型	33
2.4 理论基础	35
2.5 平行板传输线的电路参数	38
2.6 传输线结构小结	41
2.7 传输线方程	41
2.8 微带传输线	46
2.9 终端加载的无损耗传输线	49
2.10 典型的终端条件	53
2.11 连接波源、负载的传输线	58
应用讲座：有载同轴电缆阻抗的测量	63
2.12 小结	64
阅读文献	65
习题	65
第 3 章 史密斯圆图	69
3.1 反射系数与负载阻抗	69
3.2 阻抗变换	74
3.3 导纳变换	82

3.4 并联和串联电路	84
应用讲座: 史密斯圆图的应用	89
3.5 小结	90
阅读文献	91
习题	92
第4章 单端口网络和多端口网络	97
4.1 基本定义	97
4.2 互联网络	103
4.3 网络特性及其应用	108
4.4 散射参量	112
应用讲座: 电阻网络衰减器	127
4.5 小结	129
阅读文献	130
习题	131
第5章 射频滤波器设计	135
5.1 谐振器和滤波器的基本结构	135
5.2 特定滤波器的设计	147
5.3 滤波器的实现	160
5.4 耦合微带线滤波器	168
应用讲座: 低通微带线滤波器的实现	174
5.5 小结	176
阅读文献	177
习题	178
第6章 射频有源器件	182
6.1 半导体物理基础	182
6.2 射频二极管	194
6.3 双极晶体管	204
6.4 射频场效应晶体管	215
6.5 金属氧化物半导体晶体管	221
6.6 高电子迁移率晶体管	223
6.7 半导体技术的发展趋势	227
应用讲座: 射频功率晶体管的内部结构	229
6.8 小结	230
阅读文献	232
习题	233

第7章 射频有源器件模型	236
7.1 二极管模型	236
7.2 晶体管模型	240
7.3 有源器件的测量	257
7.4 器件特性的散射参量	261
应用讲座: 采用电路仿真软件为射频晶体管建模	264
7.5 小结	267
阅读文献	268
习题	269
第8章 匹配网络和偏置网络	273
8.1 采用分立元件的匹配网络	273
8.2 微带线匹配网络	287
8.3 放大器的工作状态和偏置网络	295
应用讲座: 设计7 GHz 高电子迁移率晶体管放大器的匹配网络和偏置网络	303
8.4 小结	307
阅读文献	308
习题	308
第9章 射频晶体管放大器设计	311
9.1 放大器的特性指标	311
9.2 放大器的功率关系	312
9.3 稳定性判别	316
9.4 增益恒定	324
9.5 噪声系数圆	335
9.6 等驻波系数圆	338
9.7 宽带放大器、大功率放大器和多级放大器	341
应用讲座: 中功率放大器模型性能参数的测量	353
9.8 小结	356
阅读文献	357
习题	357
第10章 振荡器和混频器	361
10.1 振荡器的基本模型	361
10.2 高频振荡器电路	380
10.3 混频器的基本特征	392
应用讲座: 采用谐波平衡分析法仿真实际的振荡器	408
10.4 小结	414
阅读文献	415
习题	416

附录 A 常用物理量和单位	419
附录 B 圆柱导体的趋肤公式	422
附录 C 复数	424
附录 D 矩阵变换	425
附录 E 半导体材料的物理参量	427
附录 F 二极管的无限长模型和有限长模型	428
附录 G 耦合器	430
附录 H 噪声分析	435
附录 I MATLAB 简介	443

第1章 引言

近几年,模拟和数字电路设计工程师们一直在不断地开发和改进电路,以适应其日益提高的工作频率。无线通信系统中,覆盖从吉赫兹频段的低端到高端的模拟电路、微处理器、存储芯片、大型计算机外围设备、工作站及个人计算机中的时钟频率的快速提高,都是这种趋势的代表。全球定位系统所用的工作频段是 1227.60 ~ 1575.42 MHz,无线局域网和高性能无线局域网 HiperLAN^①工作在 2.4 GHz,光通信信道可传输高达每秒 40 吉比特(Gbps)的数据。个人通信系统(Personal Communication System, PCS)中的低噪声放大器一般工作在 1.9 GHz,它可安装于尺度为 10 美分大小的电路板上。C 波段卫星广播系统包括 4 GHz 的上行信道和 6 GHz 的下行信道。总的来说,由于无线通信的快速扩张,工作频率在 1 GHz 以上,集成度更高的放大器、滤波器、混频器正在不断地被设计出来并投入使用。毫无疑问,这种趋势将会持续下去,这不仅将导致具有独特性能的电子系统的问世,也将带来在传统低频系统设计中不曾遇到的挑战。

本章回顾了电路由低频到高频演变过程的意义,讨论了导致设计、优化高频电路的新型工程技术方法的动机和实际原因。移动电话中的电路被作为研究对象,以描述本书的目标、研究对象和内容安排,电路中的各种元件将在随后章节中更仔细地讨论。

本章首先简要回顾、讨论并解释电路从直流到高频工作模式的转变。随着工作频率的提高,当电磁波的相应波长可与分立电路中的元件尺度相比拟时,电阻、电容、电感的电学特性将逐渐偏离它们的理想频率响应。本章的目的在于,使读者正确评价和理解高频无源元件的特性。特别是,由于高级的复杂测试设备的应用,设计工程师更应准确理解为什么电路的高频响应与低频响应不同。如果没有这些知识,实现和理解高性能系统的特殊要求是不可能的。

集中参数理论

电路元件的空间分布尺度为零(点状)。

分布参数理论

电路元件相对于工作波长,具有有限的空间分布尺度。

1.1 射频电路设计的重要性

最初的电子线路设计大约要追溯到 18 世纪末和 19 世纪初,当时能够可靠工作的电池已经问世。以发明者伏特(A. Volta, 1745—1827)命名的伏打电池能够为早期的原始电路提供可靠的直流(DC)驱动能量。然而,人们很快就发现低频交流电源(AC)能更有效地传输电能,且长距离传输的损耗更小。传输低频交流电能的有效方法是,使用依据法拉第(Faraday)电磁感

^① HiperLAN, 即 High Performance Local Area Network, 是欧洲提出的一种无线局域网标准。——译者注

应定律工作的变压器。由于查尔斯·施泰因梅茨(Charles Steinmetz), 托马斯·爱迪生(Thomas Edison), 维尔纳·西门子(Werner Siemens)和尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla)等著名工程师的开拓性工作, 发电和送变电工业得到了快速发展并渗入了我们的日常生活。麦克斯韦(James Maxwell, 1831—1879)在1864年撰写并在伦敦皇家科学院发表的一篇文章中提出了电磁场相互耦合的概念, 这种通过空间的耦合可导致波的传播。1887年赫兹(Heinrich Hertz)通过实验证明了电磁能量通过空间的辐射和接收。这个发现确立了无线通信这一快速发展的领域, 其中包括分别在20世纪20年代和30年代问世的无线电广播和电视传输, 以及分别在20世纪80年代和90年代问世的移动电话和全球定位系统(GPS)。根据新千年中的重大事件, 第三代移动电话系统(3G)和高速光通信, 可以预见高频及超高频元器件、模块与系统将得到快速增长。遗憾的是, 设计、开发能够适应当前信息技术领域实际应用的高频电路并非易事。正如下面将要详细讨论的, 仅向电子工程专业的本科一、二年级学生讲授的, 基于基尔霍夫(Kirchhoff)经典电压、电流定律的分析方法, 只能用于分析直流电路及包含电阻、电容和电感网络的低频集中参数系统, 而不能用于受电磁波传播特性制约的高频电路。

本书的主要目的是从理论和实践两方面, 向读者提供当工作频率扩展到射频(RF)和微波(MW)频段时, 模拟电路的设计方法。在此频段内, 通常认为从数百千赫开始, 电信号的相应波长缩短到了与电路的典型尺度相当的临界点, 并开始影响电路的功能。此时, 基于基尔霍夫理论的经典电路分析原理就失效了。从应用的角度来看, 电路设计工程师将面临如下问题:

- 在什么频率以上, 经典电路分析理论就需要修正?
- 什么原因造成了电子元器件的高频特性与低频特性的巨大区别?
- 是什么样的“新”理论替代了经典的基尔霍夫理论?
- 如何将这个新理论应用于实际的高频模拟电路设计?

移动电话元件

移动电话的关键元件包括:

- (a) 天线
- (b) 射频开关
- (c) 功率放大器(Power Amplifier, PA)
- (d) 低噪声放大器(Lower-Noise Amplifier, LNA)
- (e) 混频器
- (f) 压控振荡器(Voltage-Controlled Oscillator, VCO)
- (g) 滤波器(带通, 低通)
- (h) 数-模转换器(DAC)和模-数转换器(ADC)
- (i) 数字基带信号处理器

本书力图全面回答这些问题, 不仅从理论方面, 还将通过大量实例和项目设计介绍具体的应用。

为了更清楚地确定将要讨论的问题, 下面先分析图 1.1 所示的典型射频系统。