

国外电子与通信教材系列

# 射频电路设计 ——理论与应用

RF Circuit Design: Theory and Applications

[美] Reinhold Ludwig 著  
Pavel Bretchko

王子宇 张肇仪 徐承和 等译  
徐承和 审校

Prentice  
Hall



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry  
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

RF Circuit Design  
Theory and Applications

[美] Reinhold Ludwig 著  
Pavel Bretchko

王子宇 张肇仪 徐承和 等译

徐承和 审校

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

## 内 容 简 介

本书分析了普通低频电路和元件当工作频率升高到射频波段(通常指30 MHz~4 GHz)时所遇到的困难和解决办法,并重点讨论了TEM(横电磁)波的传输特性及用微带线制成的各种射频器件的原理和方法。在内容安排上,本书力图让尚未系统学习过电磁场理论电子类学科学生和工程技术人员也能了解和掌握射频电路的基本设计方法和原则。全书共分10章,前4章介绍射频传输的特点、传输线基本原理及作为射频和微波分析工具的Smith圆图、网络参量和信号流图;后6章介绍各种无源和有源射频器件(包括:滤波器、匹配网络、高频半导体器件、放大器、混频器和振荡器)的原理分析和设计方法。书中列举了大量具有实际应用价值的例题,并以较大篇幅介绍了它们的求解方法。作者还利用MATLAB数学工具软件,开发了相当数量的与本书所包含的内容和课题有关的模拟或解题软件供读者使用。

本书可以作为通信、电子类学科学生的教材或参考书。对于现已在通信、计算机及微电子等领域从事射频及微波电路设计的工程师们,这也是一本很好的参考书。

Simplified Chinese edition Copyright © 2002 by PEARSON EDUCATION NORTH ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

RF Circuit Design: Theory and Applications by Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko. Copyright © 2000.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版北亚洲有限公司合作出版。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:01-2002-1384

### 图书在版编目(CIP)数据

射频电路设计——理论与应用 / (美)路德维格(Ludwig, R.)著;王子宇等译.

-北京:电子工业出版社,2002.5

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:RF Circuit Design: Theory and Applications

ISBN 7-5053-7616-0

I. 射... II. ①路... ②王... III. 射频电路-电路设计 IV. TN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第031869号

责任编辑:李秦华

印刷者:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787 × 1092 1/16 印张:28 字数:717千字 附光盘1张

版 次:2002年5月第1版 2002年5月第1次印刷

定 价:44.00元(含光盘)

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

## 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。

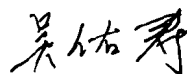
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版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

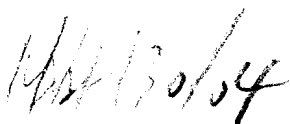
在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

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 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、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  
中国通信学会常务理事
- 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委员会委员  
徐安士 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任  
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员  
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  
移动通信国家重点实验室主任  
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委员会委员  
阮秋琦 北方交通大学教授、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  
张晓林 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任  
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员  
郑宝玉 南京邮电学院副院长、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 西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长  
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员  
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委员会委员  
徐重阳 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任  
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员  
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、教材建设委员会主任  
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、秘书长  
杜振民 电子工业出版社副社长

## 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、卫星通信和光通信)和计算机技术的迅猛发展,工作频率日益提高,射频和微波电路得到广泛的应用。据我们了解,现在国内外都严重缺乏从事射频和微波电路的设计人才。又因为目前国内大专院校采用的微波教材多是从电磁场理论出发,讨论导波系统的基本原理,极少涉及到面向应用的各种射频和微波电路,而且目前又找不到专门讲述射频电路的教科书。鉴于以上原因我们决定翻译该书,并希望该书能早日与读者见面。

本书是 Reinhold Ludwig 教授和 Pavel Bretchko 教授为美国 Worcester Polytechnic Institute(简称 WPI)电气和计算机工程系必修课编写的本科生教材,其主要特点是避开了电磁场理论的处理方法,而采用分布参量等效电路的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电路的基本设计方法和原则。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和模式,因此只能分析、讨论工作在 TEM(横电磁)模状态下的射频、微波电路和系统。

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。

本书由多人合作翻译,不同译者在译文遣词用语上难免存在一些差异,但专业名词力求统一规范。书中提到许多国外科学家姓名以及由其姓命名的器件和方程等,除了个别最为流行的如安培(Ampere)定律等仍按中译名外,一般保持原文。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,但个别情况仍沿用原文的名称,比如原文中的  $ABCD$  矩阵在国内就通常称为  $A$  矩阵,此类问题希望读者在阅读时注意。

全书共分 10 章,其中前言、第 1 章、第 2 章、第 3 章及附录由张肇仪教授翻译;第 4 章、第 5 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章由王子宇教授翻译;徐承和教授负责第 6 章、第 7 章的翻译和全书的审校工作。蒋曼英教授、刘家祯编审、李小寒高级工程师参加了译文的讨论及修改工作,在此表示感谢。由于译者水平有限,译文还有不妥之处,希望广大读者给予批评指正。

## 序 言

由于射频(RF)和微波(MW)的广泛应用,高频电路设计领域得到了工业界的特别关注。新型半导体器件使得高速数字系统和高频模拟系统不断扩张,这些在无线通信、全球定位系统、雷达以及有关电子和计算机工程学科中是有目共睹的事实,由此导致了对深刻掌握高频电路设计原理的工程师的巨大需求。

然而,对于大学生、专业工程师以及此专业的教师来说,日前存在着一个普遍的问题,即大多数现有的教材都是面向两种不同的读者:A)具有坚实理论基础的研究生;B)对数学和物理的严格性不太感兴趣的工程技术人员。其结果就是射频电路设计存在两种完全不同的方式。研究生们常常是通过电磁场处理方法进入这个领域,工程技术人员则更喜欢采用基于基尔霍夫定律的基本电路原理来处理问题。这两种方法都难以全面论述与高频电路设计原理有关的理论和实际问题。基本电路方法不涉及或者仅表面涉及到电压、电流的波动性质,这些波的反射和传输特性是影响射频电路特性的重要因素。电磁场理论方法确实涵盖了波导和传输线方面的知识,但却远未触及高频放大器、振荡器以及混频器设计方面的重要内容。

本教材的目的是发展一种射频电路设计观点,即不采用电磁场理论的方法也能讲清楚传输线原理。这样,除了大多数学院和大学为一年级学生开设的物理课程中场和波方面的知识外,读者不必具备电磁场的背景知识。具备了基本电路理论以及(或者)微电子学方面知识的学生就可以阅读本书,并通过本书了解从传输线和微带线的基本原理到各种高频电路设计过程的全面知识。本书将冗长的数学推导与正文分开,归入附录或放在例题中,从而省略了某些枯燥的理论细节,以便将重点集中在主要概念上。

为了使读者积累丰富的设计经验,我们在本书中包含了大量的例题,这些例题相当详细地讨论了各种设计方法的基本原理及难点,许多例题的篇幅甚至多达好几页。与此同时,这也会带来一些问题,特别是在电路仿真方面。显然,我们不能期望读者已经掌握了现代计算机仿真软件,诸如 MMICAD 或 ADS,这里我们仅提到了常用软件中的这两个。专业的高频仿真软件包通常是很昂贵的,而且必须熟悉它才能有效地利用它。因为 MATLAB 是被广泛应用而且价格相对低廉的数学工具,可用于分析本书中讨论的许多例题,并能在几秒钟内显示图解结果,所以,我们建立了数量相当大的 MATLAB M 文件,感兴趣的学生可以从附录 I 中所列的网站下载。特别需要指出的是,其中利用 Smith 圆图进行各种阻抗变换的计算会引起读者的兴趣。此外,本书中所有例题,特别是第 8 章和第 10 章的例题都专门进行了仿真和验证,其中线性电路模型采用 MMICAD,非线性振荡器和混频器模型则采用 ADS。

在内容安排方面,本教材有意略去了高速数字电路以及编码和调制方面的内容。虽然这些内容都很重要,但它们需要增加很多篇幅,这与本课程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。本书在 Worcester Polytechnic Institute(简称 WPI)的使用表明,这样做并未带来不利影响,因为上述大部分内容都很容易从现有的通信系统工程课中获得。

本书编排方式如下:第 1 章简要地解释了随着频率的提高,当工作波长可与分立电路元件



尺度相比拟时基本电路理论将会失效的原因。在第 2 章中引入了替代低频电路理论的传输线理论。由于电压和电流的波动性,第 3 章介绍了以反射系数为基础来分析处理阻抗变化性质的通用工具 Smith 圆图。第 4 章讨论了有流程图二端口网络,并讨论了如何利用所谓散射参量描述二端口网络。第 5 章对这些网络模型以及它们的散射参量进行了表述,用于研究无源射频滤波器电路。在讨论有源器件之前,第 6 章中回顾了一些重要半导体器件的基础知识,随后又在第 7 章中给出了它们的电路模型。第 8 章讨论了双极结晶体管和场效应晶体管的阻抗匹配和偏置网络,以努力消除潜在的有害反射并优化功率传输。第 9 章的重点是一些重要的高频放大器电路以及它们在低噪声和高功率应用中的设计难点。最后,第 10 章向读者介绍了非线性系统,并以振荡器和混频电路为例介绍了非线性系统的设计。

本书是 WPI 电气和计算机工程系必修课的教材,在射频电路设计(EE 3113,射频电路设计入门)方面的标准课时是 7 周(每周 5 课时)。该课程的主要听众是具有微电子学基础的三年级和四年级大学生。本课程不包括实验,然而有 6 个在 Philips 半导体公司录制的实际电路性能的演示录像带,并用网络分析仪在课堂上对射频电路进行现场演示测量。另外,MMICAD 和 ADS 仿真是作为正规授课内容的一部分。本书的各章都是相对独立的,目的是为了增加课程内容安排的灵活性。在 WPI,这一门 3 学分,一学期课时的内容被压缩在 7 周内讲授(总共 25~28 次课)。讲授内容如下表所示。

EE 3113 射频电路设计入门

第 1 章 引言	1.1~1.6 节
第 2 章 传输线分析	2.1~2.12 节
第 3 章 Smith 圆图	3.1~3.5 节
第 4 章 单端口网络和多端口网络	4.1~4.5 节
第 7 章 有源射频元件模型	7.1~7.2 节
第 8 章 匹配网络和偏置网络	8.1~8.4 节
第 9 章 射频晶体管放大器设计	9.1~9.4 节

其余内容则作为第 2 学期(7 周)的目标,其中包括更高级的课题,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。

高级射频电路设计原理

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

全部课程的安排经常会根据总的课时、学生的基础以及与其他相关课程的衔接而改变。

请登录 <http://www.prenhall.com/ludwig> 网站以便获取更多资料,其中包括以 PDF 文件形式存放的本书全部技术文件。

## 致 谢

作者感谢一起工作的同事、学生和实验工程师们。WPI 电气和计算机工程系系主任 John Orr 教授在介绍本课程和为射频仿真软件提供资金方面给予了极大的帮助。我们感谢 Philips 半导体公司的 Korne Vennema, Jarek Lucek 和 Scott Blum 在技术经验, 高年级学生课题的资助以及测量仪器方面提供的帮助。John Sullivan 教授, Jr. William Michalson 和 Sergey Makarov 提供了大量的技术支持。Linda Gu, Qiang Lai, Joe Plunkett, Dr. Funan Shi, Gene Bogdanov, Minhua Liu 和 Josh Resnik (他们是现在以及以前的研究生), 对 WPI 电磁和射频实验室提供了必要的帮助和支持。Reinhold Ludwig 特别感谢 Minnesota 大学 MRI 中心 J. Thomas Vaughan 教授向他介绍了传输线概念在设计强场磁共振 RF 线圈中的重要性。Pavel Bretchko 诚挚地感谢 Lehigh 大学的 Mikhail Shirokov 在所有有关的 RF/MW 电路和器件方面的有益的讨论。感谢 Prentice-Hall 的工作人员特别是 Eric Frank, Tom Robbins 和 Rose Kernan 对本书出版工作的理解和支持。

由衷地感谢 Optotek 捐赠的 MMICAD 射频模拟设计程序包和 Hewlett-Packard 公司提供 ADS 的大学许可证。

# 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 射频设计的重要性 .....	1
1.2 量纲和单位 .....	4
1.3 频谱 .....	6
1.4 无源元件的射频特性 .....	7
1.4.1 高频电阻 .....	10
1.4.2 高频电容 .....	12
1.4.3 高频电感 .....	14
1.5 片状元件及对电路板的考虑 .....	16
1.5.1 片状电阻 .....	16
1.5.2 片状电容 .....	17
1.5.3 表面安装电感 .....	18
1.6 小结 .....	19
参考文献 .....	19
习题 .....	20
第 2 章 传输线分析 .....	25
2.1 传输线理论的实质 .....	25
2.2 传输线举例 .....	27
2.2.1 双线传输线 .....	27
2.2.2 同轴线 .....	28
2.2.3 微带线 .....	28
2.3 等效电路表示法 .....	30
2.4 理论基础 .....	31
2.4.1 基本定律 .....	31
2.5 平行板传输线的电路参量 .....	35
2.6 各种传输线结构小结 .....	37
2.7 一般的传输线方程 .....	38
2.7.1 基尔霍夫电压和电流定律表示式 .....	38
2.7.2 行进的电压和电流波 .....	41
2.7.3 阻抗的一般定义 .....	41
2.7.4 无耗传输线模型 .....	42
2.8 微带传输线 .....	42
2.9 端接负载的无耗传输线 .....	45
2.9.1 电压反射系数 .....	46
2.9.2 传播常数和相速 .....	46

2.9.3	驻波	47
2.10	特殊的终端条件	49
2.10.1	端接负载无耗传输线的输入阻抗	49
2.10.2	短路传输线	50
2.10.3	开路传输线	52
2.10.4	1/4 波长传输线	53
2.11	信号源和有载传输线	55
2.11.1	信号源的相量表示法	55
2.11.2	传输线的功率考虑	57
2.11.3	输入阻抗匹配	59
2.11.4	回波损耗和插入损耗	60
2.12	小结	61
	参考文献	62
	习题	62
<b>第 3 章</b>	<b>Smith 圆图</b>	<b>66</b>
3.1	从反射系数到负载阻抗	66
3.1.1	相量形式的反射系数	66
3.1.2	归一化阻抗公式	67
3.1.3	参数反射系数方程	68
3.1.4	图形表示法	70
3.2	阻抗变换	71
3.2.1	普通负载的阻抗变换	71
3.2.2	驻波比	73
3.2.3	特殊的变换条件	75
3.2.4	计算机模拟	78
3.3	导纳变换	79
3.3.1	参数导纳方程	79
3.3.2	叠加的图形显示	81
3.4	元件的并联和串联	82
3.4.1	$R$ 和 $L$ 元件的并联	83
3.4.2	$R$ 和 $C$ 元件的并联	83
3.4.3	$R$ 和 $L$ 元件的串联	83
3.4.4	$R$ 和 $C$ 元件的串联	84
3.4.5	$T$ 形网络的例子	85
3.5	小结	87
	参考文献	88
	习题	88
<b>第 4 章</b>	<b>单端口网络和多端口网络</b>	<b>94</b>
4.1	基本定义	94
4.2	互连网络	100

4.2.1	网络的串联	100
4.2.2	网络的并联	101
4.2.3	级连网络	102
4.2.4	$ABCD$ 网络参量小结	103
4.3	网络特性及其应用	106
4.3.1	网络参量之间的换算关系	106
4.3.2	微波放大器分析	108
4.4	散射参量	110
4.4.1	散射参量的定义	111
4.4.2	散射参量的物理意义	113
4.4.3	链形散射矩阵	115
4.4.4	$Z$ 参量与 $S$ 参量之间的转换	117
4.4.5	信号流图模型	118
4.4.6	$S$ 参量的推广	123
4.4.7	散射参量的测量	125
4.5	小结	129
	参考文献	130
	习题	130
<b>第 5 章</b>	<b>射频滤波器设计</b>	<b>134</b>
5.1	谐振器和滤波器的基本结构	134
5.1.1	滤波器的类型和技术参数	134
5.1.2	低通滤波器	137
5.1.3	高通滤波器	139
5.1.4	带通和带阻滤波器	140
5.1.5	插入损耗	144
5.2	特定滤波器的实现	147
5.2.1	巴特沃斯滤波器	147
5.2.2	切比雪夫滤波器	149
5.2.3	标准低通滤波器设计的反归一化	154
5.3	滤波器的实现	161
5.3.1	单位元件	162
5.3.2	Kuroda 规则	162
5.3.3	微带线滤波器的设计实例	164
5.4	耦合微带线滤波器	169
5.4.1	奇模和偶模的激励	169
5.4.2	带通滤波器单元	171
5.4.3	级连带通滤波器单元	172
5.4.4	设计实例	174
5.5	小结	175
	参考文献	176

习题	177
<b>第 6 章 有源射频元件</b>	<b>181</b>
6.1 半导体基础	181
6.1.1 半导体的物理特性	181
6.1.2 PN 结	185
6.1.3 肖特基(Schottky)接触	192
6.2 射频二极管	194
6.2.1 肖特基二极管	194
6.2.2 PIN 二极管	196
6.2.3 变容二极管	200
6.2.4 IMPATT 二极管	202
6.2.5 隧道二极管	203
6.2.6 TRAPATT, BARRITT 和 Gunn 二极管	205
6.3 BJT 双极结晶体管(Bipolar-Junction Transistor)	206
6.3.1 结构	206
6.3.2 功能	208
6.3.3 频率响应	212
6.3.4 温度性能	214
6.3.5 极限值	216
6.4 射频场效应晶体管	217
6.4.1 结构	217
6.4.2 功能	219
6.4.3 频率响应	223
6.4.4 极限值	223
6.5 高电子迁移率晶体管	224
6.5.1 结构	224
6.5.2 功能	224
6.5.3 频率响应	227
6.6 小结	227
参考文献	228
习题	229
<b>第 7 章 有源射频电路器件模型</b>	<b>233</b>
7.1 二极管模型	233
7.1.1 非线性二极管模型	233
7.1.2 线性二极管模型	235
7.2 晶体管模型	237
7.2.1 大信号 BJT 模型	237
7.2.2 小信号 BJT 模型	243
7.2.3 大信号 FET 模型	251
7.2.4 小信号 FET 模型	253

7.3	有源器件的测量	256
7.3.1	双极晶体管的 DC 特性	256
7.3.2	双极晶体管的 AC 参量的测量	257
7.3.3	场效应晶体管参量的测量	260
7.4	用散射参量表征器件特性	261
7.5	小结	264
	参考文献	265
	习题	265
<b>第 8 章</b>	<b>匹配网络和偏置网络</b>	<b>270</b>
8.1	分立元件的匹配网络	270
8.1.1	双元件的匹配网络	270
8.1.2	匹配禁区、频率响应以及品质因数	277
8.1.3	T 形匹配网络和 $\pi$ 形匹配网络	285
8.2	微带线匹配网络	288
8.2.1	从分立元件到微带线	288
8.2.2	单节短截线匹配网络	291
8.2.3	双短截线匹配网络	294
8.3	放大器的工作状态和偏置网络	296
8.3.1	放大器的工作状态和效率	297
8.3.2	双极晶体管的偏置网络	300
8.3.3	场效应晶体管的偏置网络	304
8.4	小结	304
	参考文献	305
	习题	306
<b>第 9 章</b>	<b>射频晶体管放大器设计</b>	<b>309</b>
9.1	放大器的特性指标	309
9.2	放大器的功率关系	310
9.2.1	射频源	310
9.2.2	转换功率增益	311
9.2.3	其他功率关系	312
9.3	稳定性判定	314
9.3.1	稳定性判定圆	314
9.3.2	绝对稳定	316
9.3.3	放大器的稳定措施	320
9.4	增益恒定	322
9.4.1	单向化设计法	322
9.4.2	单向化设计误差因子	327
9.4.3	双共轭匹配设计法	328
9.4.4	功率增益和资用功率增益圆	330
9.5	噪声系数圆	334

9.6	等驻波比圆 .....	337
9.7	宽带、高功率、多级放大器 .....	341
9.7.1	宽带放大器 .....	341
9.7.2	大功率放大器 .....	348
9.7.3	多级放大器 .....	351
9.8	小结 .....	353
	参考文献 .....	354
	习题 .....	355
<b>第 10 章</b>	<b>振荡器和混频器 .....</b>	<b>359</b>
10.1	振荡器的基本模型 .....	359
10.1.1	负阻振荡器 .....	360
10.1.2	反馈振荡器的设计 .....	362
10.1.3	振荡器的设计步骤 .....	364
10.1.4	石英晶体振荡器 .....	366
10.2	高频振荡器电路 .....	368
10.2.1	固定频率振荡器 .....	371
10.2.2	介质谐振腔振荡器 .....	375
10.2.3	YIG 调谐振荡器 .....	379
10.2.4	压控振荡器 .....	379
10.2.5	耿氏二极管(Gunn diode)振荡器 .....	382
10.3	混频器的基本特征 .....	383
10.3.1	基本原理 .....	383
10.3.2	频域分析 .....	385
10.3.3	单端混频器设计 .....	386
10.3.4	单平衡混频器 .....	392
10.3.5	双平衡混频器 .....	393
10.4	小结 .....	394
	参考文献 .....	395
	习题 .....	395
<b>附录 A</b>	<b>常用物理量和单位 .....</b>	<b>399</b>
<b>附录 B</b>	<b>圆柱导体的趋肤公式 .....</b>	<b>403</b>
<b>附录 C</b>	<b>复数 .....</b>	<b>405</b>
<b>附录 D</b>	<b>矩阵变换 .....</b>	<b>406</b>
<b>附录 E</b>	<b>半导体的物理参量 .....</b>	<b>408</b>
<b>附录 F</b>	<b>长和短的二极管模型 .....</b>	<b>409</b>
<b>附录 G</b>	<b>耦合器 .....</b>	<b>411</b>
<b>附录 H</b>	<b>噪声分析 .....</b>	<b>417</b>
<b>附录 I</b>	<b>MATLAB 简介 .....</b>	<b>425</b>
<b>附录 J</b>	<b>本书中英文缩写词 .....</b>	<b>430</b>



# 第1章 引言

众所周知,由于工作频率的日益提高,模拟和数字电路设计工程师们正在不断地开发和改进电路。用于无线通信的模拟电路是在吉赫兹(GHz)波段。高性能计算机、工作站,当然还有作为这方面例子的个人计算机,它们所用电路的时钟频率不断地增加。全球定位系统载波频率在 1227.60 MHz 和 1575.42 MHz 范围。个人通信系统中用的低噪声放大器工作在 1.9 GHz,并可安装在比 10 美分硬币还小的电路板上。在 C 波段的卫星广播包括 4 GHz 上行和 6 GHz 下行系统。一般说来,由于无线通信的快速发展,更紧凑的放大器、滤波器、振荡器和混频器电路正被设计出来并交付使用。通常这些电路的工作频率高于 1 GHz。毫无疑问这种趋势将会继续下去,因此不仅要有独特性能的技术装置,而且要专门设计解决在常用的低频系统中没有遇到过的问题。

本章回顾了由低频到高频电路的演变过程,并从物理概念的角度引出和揭示了采用新技术方法去设计、优化此类电路的必要性。本教材的目标及其组织内容安排以移动电话作为概要介绍的载体,移动电话中的有关电路和元件将在后续章节中讨论分析。

本章的内容是以简要地回顾从直流(DC)过渡到高频工作模式开始的。随着频率的升高以及其相应的电磁波的波长变得可与分立电路元件的尺寸相比拟时,电阻、电容和电感这些元件的电响应将开始偏离它们的理想频率特性。本章的目的是让读者了解和熟悉高频无源器件的特性,特别是由于复杂的测量仪器的应用,设计工程师必须确切地知道高频电路的高频特性与低频电路有什么区别及如何实现它。没有这些知识,要开发和了解这些有专门需求的高性能系统是不可能的。

## 1.1 射频设计的重要性

最初的电子线路设计,大约要追溯到 18 世纪末和 19 世纪初。当时的蓄电池已能可靠地工作,该电池后来用它的发明者 A. Volta(1745 ~ 1827)的名字命名。伏打电池为驱动最初始的电路提供了可靠的直流(DC)能量。之后又出现了低频交流(AC)功率源,它能更有效地输送电力,而只有很小的传输损耗,并且便于通过按照法拉第(Faraday)感应定律工作的变压器,改换电能的路由。由于像著名的工程师 Charles Steinmetz, Thomas Edison, Werner Siemens 和 Nikolas Tesla 等先驱者的发明创造,能量产生和分配工业迅速增长并走进我们的生活。James Maxwell(1831 ~ 1879)在 1864 年伦敦英国皇家学会首次发表的一篇文章中,提出了电场和磁场通过其所在的空间中交连耦合会导致波传播的设想。1887 年 Heinrich Hertz 实验证实了电磁能量可通过空间发射和接收。该发明预示着无线通信领域的迅速发展,从 1920 年的无线电,1930 年的 TV 传输,直到 1980 年的移动电话和 1990 年的全球定位系统(GPS)。遗憾的是,这些适用于高频电路的设计和开发,不能直截了当地应用于当今的无线通信,原因以后将详细讨论。向一、二年级电子工程大学生介绍的普通基尔霍夫(Kirchhoff)类型的电压和电流定律等分析工具,严格地讲只能应用于 DC 和低频集中参数系统,包括由电阻器、电容器和电感器组成的网络,而