

ADS 应用详解

——射频电路设计与仿真

陈艳华 李朝晖 夏玮 编著

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TN710.02/21

2008

AUS 应用 详解

——射频电路设计与仿真

陈艳华 李朝晖 夏玮 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

ADS 应用详解: 射频电路设计与仿真 / 陈艳华, 李朝晖, 夏玮编著. —北京: 人民邮电出版社, 2008.9

ISBN 978-7-115-18407-8

I. A… II. ①陈…②李…③夏… III. 射频电路—电路设计: 计算机辅助设计—软件包, ADS IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 095131 号

内 容 提 要

本书介绍使用 ADS 进行射频电路设计和仿真的基础知识和方法。本书内容涉及射频电路的基础理论、ADS 的基本概况以及 ADS 各种仿真功能, 书中完整地介绍了 6 个利用 ADS 进行射频电路设计与仿真的实例, 包括功率分配器、射频滤波器、低噪声放大器、混频器、压控振荡器和收发机。

本书内容紧凑、实例丰富、结构严谨、深入浅出, 不论是对初学射频电路设计与仿真的读者, 还是对射频电路设计与仿真有过一定经验的读者, 都会起到有益的帮助。

ADS 应用详解——射频电路设计与仿真

- ◆ 编 著 陈艳华 李朝晖 夏 玮
责任编辑 刘 浩
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 21.75
字数: 534 千字 2008 年 9 月第 1 版
印数: 1—3 000 册 2008 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-18407-8/TN

定价: 49.00 元

读者服务热线: (010)67132692 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

射频和微波的广泛应用使射频电路设计领域得到了工业界的特别关注，新兴半导体器件使得高频电路系统不断扩张，这些应用在无线通信、全球定位及雷达等行业中有目共睹。但是，射频设计挑战在通信行业存在更普遍，46%以上的通信设计工程师认为射频设计是最大的技术挑战之一。在通信产品设计中，射频问题比较多地表现在电路匹配、接收灵敏度、器件参数一致性问题，解决这些问题需要具有强大的工具支持，而 ADS 是一种功能强大的射频电路设计与仿真工具软件。本书是基于 ADS2005A 版本操作讲解的，由于 ADS2004A、ADS2005A、ADS2006A 版本软件的界面和操作完全相同，因此它同样适合于 ADS2004A 和 ADS2006A 这两个 ADS 软件版本的学习。

本书特点

- 基础性：系统介绍了射频电路设计的基本概念、基本组成以及性能要求，对读者起点要求低，容易入门。
- 全面性：全面介绍了 ADS 软件的各种功能，使读者能够对 ADS 有更加系统的了解。
- 工程性：本书实例很有代表性，不仅能够让读者熟练掌握 ADS 的基本操作以及各种仿真，而且还能让读者掌握射频电路中最重要几个部分的设计规则，对实际工程有很强的指导作用。

本书内容

本书分为两大部分，第 1 章～第 10 章为基础知识部分，第 11 章～第 16 章为实例部分。

基础知识部分主要包括了射频电路的基础理论以及 ADS 的基本概况和各种仿真功能介绍。其中，详细讲解了射频电路的基础理论知识它是电路仿真的基础；ADS 基本概况部分介绍了 ADS 的基本窗口和操作、基本元件的功能以及参数设置等；仿真功能介绍中包括 DC 仿真、AC 仿真、S 参数仿真、谐波平衡仿真、电路包络仿真、增益压缩仿真和瞬态仿真，在每种仿真的介绍过程中都有相应的仿真实例。

实例部分包含 6 种常用的射频电路模块或系统的设计与仿真，介绍怎样应用 ADS 对构成射频电路的主要部分进行仿真。其中，功率分配器、射频滤波器、低噪声放大器、混频器、压控振荡器是射频电路必不可少的组成部分；而收发机可以代表几乎所有的通信系统模型，因此实例都非常具有普遍性。本部分中的每个实例都会首先介绍模块或系统的基本原理和指标要求，然后根据指标要求对它们进行设计和仿真。

本书以 ADS 在射频电路设计与仿真中的应用方法为中心，注重提高读者在射频电路设计中正确使用 ADS 的仿真功能的能力。读者只要具备基本的射频电路基础知识，即可轻松掌握书中内容。

本书由陈艳华、李朝晖、夏玮主编，参加本书编写的还有张宇栋、郑镭、赵清涛、么大锁、徐丽丽、李胜利、齐辉、王京、武文阳、陈国莹、武晶晶、王建军、武春玲、高少华、唐贺利等。由于水平和时间有限，书中难免存在不足，肯请读者批评指正(电子函件: book_better@sina.com)。

编者

2008 年 8 月

目 录

第 1 章 射频电路基础.....1	2.4.1 集总参数元件..... 53
1.1 频谱及其应用1	2.4.2 分布参数元件..... 57
1.2 射频通信系统概述3	2.4.3 非线性元件..... 58
1.3 射频电路理论基础4	2.4.4 信号源..... 58
1.3.1 无源元件.....4	2.4.5 系统模型元件..... 60
1.3.2 传输线.....7	2.5 小结..... 61
1.3.3 史密斯圆图13	第 3 章 ADS 仿真基础..... 62
1.3.4 二端口网络.....15	3.1 ADS 仿真功能概述..... 62
1.4 功率、增益、噪声和非线性18	3.1.1 ADS 的各种仿真功能描述..... 62
1.4.1 功率和增益18	3.1.2 ADS 的仿真控制器..... 65
1.4.2 噪声和噪声系数19	3.1.3 ADS 的仿真辅助工具..... 66
1.4.3 电路的非线性21	3.2 ADS 电路仿真基础..... 68
1.5 小结.....24	3.2.1 新建工程和设计原理图..... 68
第 2 章 ADS 概述与基本操作..... 25	3.2.2 设置仿真参数和执行仿真..... 70
2.1 ADS 概述.....25	3.3 ADS 系统级仿真基础..... 74
2.1.1 ADS 的仿真设计方法25	3.3.1 新建系统工程和原理图..... 74
2.1.2 ADS 的辅助设计功能26	3.3.2 系统仿真..... 76
2.1.3 ADS 与其他 EDA 软件和 测试设备间的连接27	3.4 使用 ADS 的仿真范例..... 84
2.2 ADS 主要操作窗口28	3.5 小结..... 88
2.2.1 主窗口.....28	第 4 章 直流仿真.....89
2.2.2 原理图设计窗口31	4.1 直流仿真介绍..... 89
2.2.3 布局图设计窗口37	4.1.1 基本功能与基本原理..... 89
2.2.4 数据显示窗口38	4.1.2 仿真面板与仿真控制器..... 90
2.3 ADS 基本操作41	4.1.3 仿真的相关参数..... 92
2.3.1 ADS 工程相关操作41	4.1.4 ADS 中的直流仿真例程..... 94
2.3.2 ADS 设计相关操作44	4.2 直流仿真实例..... 98
2.3.3 ADS 仿真结果显示和分析 相关操作49	4.2.1 建立工程和设计..... 98
2.3.4 ADS 仿真相关操作51	4.2.2 原理图仿真..... 104
2.3.5 ADS 的输入输出52	4.3 小结..... 109
2.4 ADS 的基本元件53	第 5 章 交流仿真..... 110
	5.1 交流仿真介绍.....110

5.1.1	交流仿真的原理和功能	110	7.2.2	双音的谐波平衡法仿真	168
5.1.2	交流仿真面板与交流仿真 控制器	111	7.2.3	针对 TOI 测量作 RF 功率 扫描	172
5.1.3	交流仿真相关参数设置	113	7.3	小结	174
5.1.4	ADS 中的交流仿真例程	116	第 8 章	电路包络仿真	175
5.2	交流仿真实例	118	8.1	电路包络仿真介绍	175
5.2.1	建立原理图	118	8.1.1	电路包络仿真的基本功能 与基本原理	175
5.2.2	原理图仿真	119	8.1.2	电路包络仿真面板与仿真 控制器	176
5.2.3	噪声分析	123	8.1.3	电路包络仿真相关参数设置	177
5.2.4	Vcc 扫描	123	8.1.4	ADS 中的电路包络仿真例程	181
5.3	小结	125	8.2	电路包络仿真实例	183
第 6 章	S 参数仿真	126	8.2.1	对行为级放大器的电路包络 仿真	184
6.1	S 参数仿真介绍	126	8.2.2	对有 GSM 源的放大器电路 进行仿真	190
6.1.1	S 参数仿真的原理和功能	126	8.3	小结	195
6.1.2	S 参数仿真面板与仿真控 制器	126	第 9 章	增益压缩仿真	196
6.1.3	S 参数仿真相关参数设置	130	9.1	增益压缩仿真介绍	196
6.1.4	ADS 中的 S 参数仿真例程	132	9.1.1	增益压缩仿真的基本功能 与基本原理	196
6.2	S 参数仿真实例	136	9.1.2	增益压缩仿真面板与仿真 控制器	196
6.2.1	设置理想元件的电路和仿真	136	9.1.3	增益压缩仿真相关参数设置	199
6.2.2	实际元件构成的电路图仿真	139	9.1.4	ADS 中的增益压缩仿真例程	200
6.2.3	匹配电路的设计	141	9.2	增益压缩仿真实例	204
6.2.4	匹配电路的优化	145	9.2.1	基于 XDB 仿真控制器的 增益压缩仿真	204
6.2.5	稳定性、噪声圆和增益分析	148	9.2.2	用功率扫描对功率压缩进行 仿真	206
6.2.6	对 S2P 文件读/写 S 参数数据	149	9.3	小结	208
6.3	小结	151	第 10 章	瞬态仿真	209
第 7 章	谐波平衡法仿真	152	10.1	瞬态仿真介绍	209
7.1	谐波平衡法仿真介绍	152	10.1.1	瞬态仿真的基本功能与 基本原理	209
7.1.1	谐波平衡法仿真原理和功能	152			
7.1.2	谐波平衡法仿真面板与 仿真控制器	153			
7.1.3	谐波平衡法仿真相关参数 设置	157			
7.1.4	ADS 中的谐波平衡法仿真 例程	160			
7.2	谐波平衡法仿真实例	164			
7.2.1	建立并运行一个基频谐波 平衡法仿真	164			

10.1.2	瞬态仿真面板与仿真控制器	209	13.1.2	低噪声放大器的设计原则	265
10.1.3	瞬态仿真相关参数设置	212	13.2	低噪声滤波器的设计与仿真	266
10.1.4	ADS 中的瞬态仿真例程	214	13.2.1	晶体管直流工作点的扫描	266
10.2	瞬态仿真实例	217	13.2.2	晶体管的 S 参数扫描	269
10.3	小结	222	13.2.3	SP 模型的仿真设计	272
第 11 章	功率分配器的设计与仿真	223	13.2.4	综合指标的实现	280
11.1	功率分配器的基本原理与指标	223	13.3	封装模型仿真设计	281
11.1.1	基本功能与基本原理	223	13.3.1	直流偏置网络设计	282
11.1.2	功率分配器的基本指标	225	13.3.2	封装模型的仿真	283
11.2	功率分配器的原理图设计、仿真与优化	225	13.4	小结	286
11.2.1	建立工程与设计原理图	225	第 14 章	混频器的设计与仿真	287
11.2.2	原理图仿真	230	14.1	混频器的原理	287
11.2.3	电路参数优化	231	14.2	混频器的设计	288
11.3	功率分配器的版图生成与仿真	235	14.2.1	3dB 定向耦合器的设计	288
11.3.1	版图的生成	235	14.2.2	完整混频器电路设计	294
11.3.2	版图仿真与实验测试	236	14.2.3	低通滤波器的设计	296
11.4	小结	238	14.3	混频器性能仿真	298
第 12 章	射频滤波器设计	239	14.3.1	混频器功能仿真	298
12.1	射频滤波器的基本原理与指标	239	14.3.2	本振功率的选择	301
12.2	ADS 中的滤波器设计工具	241	14.3.3	混频器的三阶交调点分析	302
12.2.1	滤波器电路的生成	241	14.3.4	混频器的输入驻波比仿真	305
12.2.2	滤波器仿真	244	14.4	小结	306
12.3	微带射频滤波器的设计与仿真	246	第 15 章	压控振荡器的设计与仿真	307
12.3.1	微带滤波器的基本原理	246	15.1	振荡器基本介绍	307
12.3.2	微带耦合滤波器的设计	247	15.2	振荡器的设计与仿真	308
12.3.3	仿真参数设置和原理图仿真	251	15.2.1	偏置电路的设计	308
12.3.4	电路参数优化	253	15.2.2	可变电容 VC 特性曲线测试	311
12.4	滤波器的版图生成与仿真	257	15.2.3	压控振荡器的设计	313
12.4.1	版图的生成	257	15.3	小结	320
12.4.2	版图仿真与实验测试	259	第 16 章	ADS 系统仿真实例	321
12.5	小结	262	16.1	收发信机基本理论	321
第 13 章	低噪声放大器设计与仿真	263	16.2	收发机系统仿真	322
13.1	低噪声放大器基础	263	16.2.1	零中频接收机仿真	322
13.1.1	低噪声放大器的功能和指标	263	16.2.2	外差式接收机仿真	333
			16.2.3	发射机预算增益仿真	337
			16.3	小结	341

第1章 射频电路基础

随着通信技术的发展，通信设备所用频率日益提高，射频（RF）和微波（MW）电路在通信系统中得到了广泛应用，高频电路设计领域也得到了工业界的特别关注，新型半导体器件制造技术的不断发展更使得高速数字系统和高频模拟系统的应用领域不断扩张。现在，微波射频识别系统（RFID）的载波频率在 915MHz 和 2450MHz 的频率范围内；全球定位系统（GPS）的载波频率在 1227.60MHz 和 1575.42MHz 的频率范围内；个人通信系统中的射频电路的工作频率为 1.9GHz；在 C 波段卫星广播通信系统中包括频率为 4GHz 的上行通信链路和 6GHz 的下行通信链路。通常这些电路的工作频率都在 1GHz 以上，并且随着通信技术的发展，这种趋势会一直持续下去。处理这种频率很高的电路，不仅需要特别的设备和装置，而且还需要用到直流电路和低频电路中没有用到的理论知识。

本章将系统地介绍射频电路的一些基础知识。首先给出明确的频谱分段以及各段频谱的特点；接着通过一个典型的射频电路系统以及其中的单元，举例说明射频通信系统的主要特点；然后介绍无源器件、传输线理论、史密斯圆图和二端口网络等射频电路设计知识；最后介绍增益、噪声和非线性等射频电路的基本指标。

1.1 频谱及其应用

由于在很多领域的应用中，都需要系统工作于一定的频率范围之内，因此需要对频率进行相应的分段。近年来对于频谱的分段已经进行了几次，其中最常用的是电气和电子工程师协会（IEEE）建立的分段，如表 1.1 所示。

表 1.1 IEEE 频谱分段

频段名称	频率范围	波长	传播特性或应用
ELF（极低频）	30~300Hz	10 000~1 000km	传播损耗小，通信距离远，信号稳定可靠，渗入地层、海水能力强
VF（音频）	300~3000Hz	1000~100km	
VLF（甚低频）	3~30kHz	100~10km	
LF（低频）	30~300kHz	10~1km	导航、长距离通信
MF（中频）	300~3000kHz	1~0.1km	广播、船舶通信、飞行通信
HF（高频）	3~30MHz	100~10m	广播、中远距离通信
VHF（甚高频）	30~300MHz	10~1m	移动通信、电视、雷达、导航
UHF（特高频）	300~3000MHz	100~10cm	与 VHF 类同，还用于散射通信、卫星通信等
SHF（超高频）	3~30GHz	10~1cm	
EHF（极高频）	30~300GHz	1~0.1cm	

续表

频段名称	频率范围	波长	传播特性或应用
亚毫米波	300~3000GHz	0.1~0.01mm	参考上面分段
P 波段	0.23~1GHz	130~30cm	
L 波段	1~2GHz	30~50cm	
S 波段	2~4GHz	15~7.5cm	
C 波段	4~8GHz	7.5~3.75cm	
X 波段	8~12.5GHz	3.75~2.4cm	
Ku 波段	12.5~18GHz	2.4~1.67cm	
K 波段	18~26.5GHz	1.67~1.13cm	
Ka 波段	26.5~40GHz	1.13~0.75cm	
毫米波	40~300GHz	0.75~1mm	
亚毫米波	300~3000GHz	1~0.1mm	

从表 1.1 可以看出 VHF/UHF 波段是典型的电视设备工作频段，这两个波段的波长达到了与电子系统的实际尺寸相当的水平。因此，从这个频段开始必须在有关电子线路中考虑电流和电压信号的波的性质。这里定义频率高于这个波段的所有频段为射频频段，工作在射频频段的电路称为射频电路。

射频频段的主要应用领域有如下 5 方面。

(1) 卫星通信与卫星电视广播。

- 双边带广播系统 (DBS-Direct Broadcast System)。
- C 波段: 4/6GHz, 下行 4GHz, 上行 6GHz。
- Ku 波段: 12/15GHz, 下行 12GHz, 上行 15GHz。
- 卫星间通信: 36GHz。

(2) 微波中继通信。

- 干线微波: 2.1GHz, 8GHz, 11GHz。
- 支线微波: 6GHz, 8GHz, 11GHz, 36GHz。
- 农村多址 (一点多址): 1.5GHz, 2.4GHz, 2.6GHz。

(3) 雷达、气象、测距、定位。

- 雷达远程警戒: P, L, S, C。
- 精确制导: X, Ka。
- 气象: 1.7GHz, 0.1375GHz。
- 汽车防撞、自动记费: 36GHz, 60GHz。
- 防盗: 9.4GHz。
- 全球定位: 1227.60MHz 和 1575.42MHz。

(4) 射电天文: 36GHz, 94GHz, 125GHz。

(5) 计算机无线网: 2.5GHz, 5.8GHz, 36GHz。

1.2 射频通信系统概述

射频电路最主要的应用领域就是无线通信，图 1.1 所示为一个典型的无线通信系统框图，下面就以这个系统为例分析射频电路在整个无线通信系统中的应用。

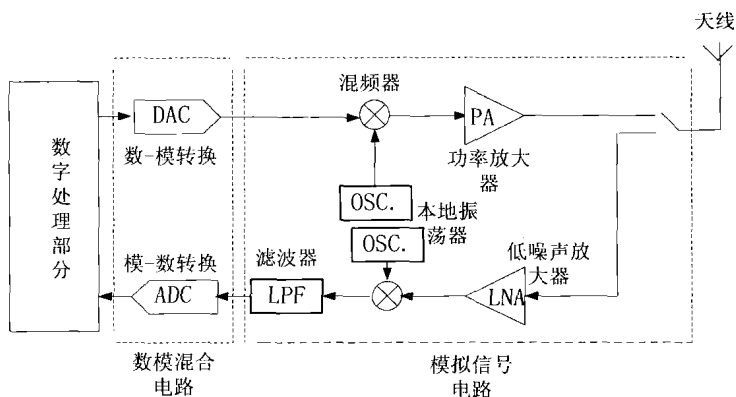


图 1.1 无线通信系统框图

图 1.1 所示为一个无线通信收发机（tranceiver）的系统模型，它包含了发射机电路、接收机电路以及通信天线，可以应用于个人通信和无线局域网中。在这个系统中，数字处理部分主要是对数字信号进行处理，包括采样、压缩和编码等，然后通过数一模转换器变成模拟信号进入模拟信号电路单元。

模拟信号电路分为两部分：发射部分和接收部分。发射部分的主要作用是：将数一模转换输出的低频模拟信号与本地振荡器提供的高频载波经过混频器上变频成射频调制信号，然后将调制好的射频信号经过天线辐射到空间中去。接收部分的主要作用是：先将由天线耦合进来的空间辐射信号（微弱信号）经过低噪声放大器放大，然后与本地振荡信号经过混频器下变频为包含中频信号分量的信号。滤波器的作用就是将有用的中频信号过滤出来后输入模一数转换器转换成数字信号，然后进入数字处理部分处理。

下面针对图 1.1 中的低噪声放大器（LNA）讨论一般射频电路的组成和特点。对于个人通信终端来说，这是一个 1.9GHz 的低噪声放大器。图 1.2 给出了这个放大器的电路原理图，

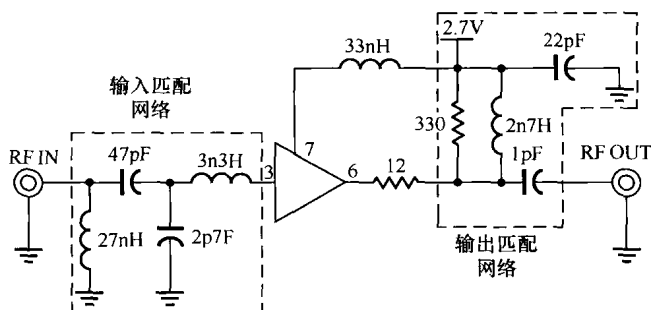


图 1.2 用于个人通信终端的低噪声放大器电路图

注意输入信号是通过一个匹配滤波网络输入放大模块的。放大模块一般采用晶体管的共射极结构，其输入阻抗必须与位于低噪声放大器前面的滤波器的输出阻抗相匹配，从而保证最佳传输功率和最小反射系数。对于射频电路设计来说，这种匹配是必须的。此外，低噪声放大器的输出阻抗必须与其后端的混频器输入阻抗相匹配，从而保证放大器输出的信号能完全、无反射地输入到混频器中。这些匹配网络由独立的无源器件或微带线组成，它们在高频情况下的电特性与在低频情况下完全不同。

图 1.3 给出了这个功率放大器的电路板图。从图上可以看出微带线实际上就是一定长度和宽度的敷铜带，与微带线连接的是片状电阻、电容和电感。

了解、分析、设计和最终制造这种射频电路，需要了解很多关于射频电路设计的知识和关键课题。在本章后面的部分，将对这些知识进行介绍。

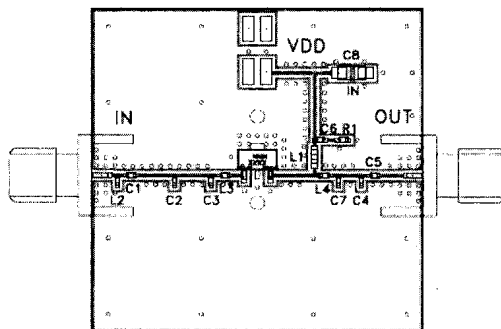


图 1.3 用于个人通信终端的低噪声放大器电路板图

1.3 射频电路理论基础

为了进一步了解射频电路，本节将介绍无源元件、传输线理论、史密斯圆图和二端口网络等射频电路的一些基本理论知识。

1.3.1 无源元件

射频电路与数字、低频电路的不同之处就是大量使用无源元件，它们主要用于：

- 阻抗匹配或转换。
- 抵消寄生元件的影响（扩展带宽）。
- 提高频率选择性（谐振、滤波和调谐）。
- 移相网络、负载等。

无源元件一个很重要的参数就是品质因数（Quality Factor, Q 值），其定义见式 (1.1)，它表示元件或电路在某个频率所存储的能量与所消耗的能量之比。

$$Q = 2\pi \frac{\text{最大存储能量}}{\text{消耗能量}} \quad (1.1)$$

下面以 RL 并联回路为例，计算电路的品质因数。假设有激励电压为

$$v(t) = V_0 \cos(\omega t) \quad (1.2)$$

则电感中的电流为

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int v(t) dt = \frac{V_0}{\omega L} \sin(\omega t) \quad (1.3)$$

电感中储存的能量以及最大值分别为

$$E_L = \frac{1}{2} Li_L^2 = \frac{1}{2} L \left(\frac{V_0}{\omega L} \right)^2 \sin^2(\omega t) \quad (1.4)$$

$$E_{L,\max} = \frac{1}{2}L\left(\frac{V_0}{\omega L}\right)^2 \quad (1.5)$$

电路中每个周期消耗的能量为

$$E_R = \frac{V_0^2 T}{2R} = \frac{V_0^2}{2Rf} \quad (1.6)$$

将式 (1.5) 和式 (1.6) 代入式 (1.1) 中, 可以得到回路的品质因数为

$$Q = \frac{R}{\omega L} \quad (1.7)$$

有了品质因数的概念, 可以更方便地分析无源元件在高频情况下的特性。

1. 高频电阻

低频电子学中最普通的电路元件就是电阻, 它的作用是通过将一些电能转化成热能来达到降低电压的目的。电阻的高频等效电路如图 1.4 所示, 其中电感 L 模拟电阻两端引线的寄生电感, 电容 C 是考虑到实际引线结构的电容效应而加的寄生电容, 模拟电荷分离效应。

根据电阻的等效电路图, 可以方便地计算出整个电阻的阻抗:

$$Z = j\omega L + \frac{1}{j\omega C + 1/R} \quad (1.8)$$

图 1.5 所示描绘了电阻的阻抗绝对值与频率的关系, 低频时电阻的阻抗是 R , 然而当频率升高并超过一定值时, 寄生电容的影响成为主要的, 它引起电阻阻抗的下降。当频率继续升高时, 由于引线电感的影响, 总的阻抗上升, 引线电感在很高的频率下代表一个开路线或无限大阻抗。

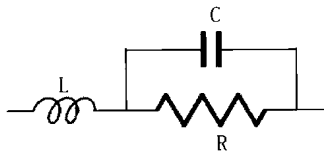


图 1.4 高频电阻等效电路

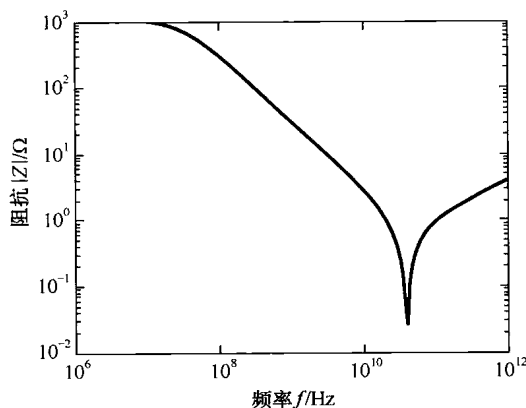


图 1.5 一个典型的 $1\text{k}\Omega$ 电阻阻抗绝对值与频率的关系

2. 高频电容

片状电容在射频电路中的应用十分广泛, 它可以用于滤波器调频、匹配网络和晶体管偏置等很多电路中, 因此很有必要了解它的高频特性。电容的高频等效电路如图 1.6 所示, 其中引线寄生电感用一个串连的电感 L 表示; 引线导体损耗用一个串联的等效电阻 R_1 表示; 介质损耗用一个并联的电阻 R_2 表示。

同样可以得到一个典型的电容器的阻抗绝对值与频率的关系, 如图 1.7 所示。由于存在

介质损耗和有限的引线，电容显示出与电阻同样的谐振特性。

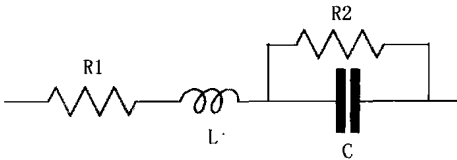


图 1.6 高频电容等效电路

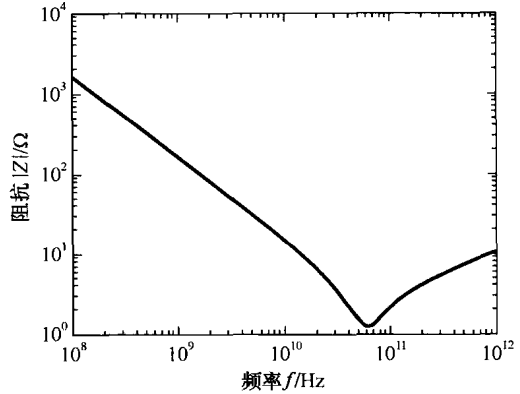


图 1.7 一个典型的 1pF 电容阻抗绝对值与频率的关系

3. 高频电感

电感的应用相对于电阻和电容来说较少，主要用于晶体管的偏置网络或滤波器中。电感通常由导线在圆导体柱上绕制而成，因此电感除了考虑本身的感性特征外，还需要考虑导线的电阻以及相邻线圈之间的分布电容。高频电感的等效电路模型如图 1.8 所示，寄生旁路电容 C 和串联电阻 R 分别是考虑到分布电容和导线电阻的综合效应而加的。

与电阻和电容相同，电感的高频特性同样与理想电感的预期特性不同，如图 1.9 所示。首先，当频率接近谐振点时，高频电感的阻抗迅速提高；然后，当频率继续提高时，寄生电容 C 的影响成为主要的，线圈阻抗逐渐降低。

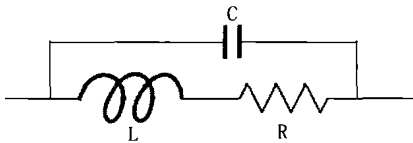


图 1.8 高频电感的等效电路

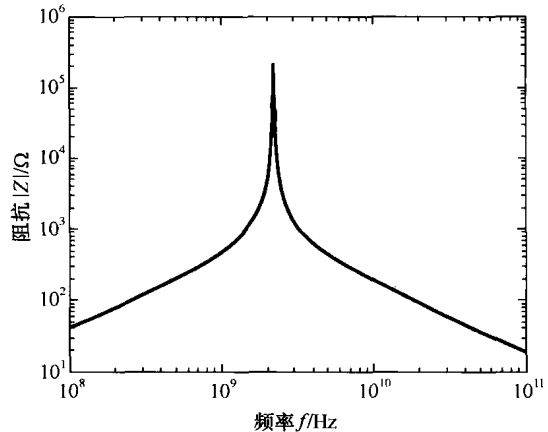


图 1.9 电感阻抗绝对值与频率的关系

总之，在高频电路中，导线连同电阻、电容和电感这些基本无源元件的性能明显与理想元件特征不同。读者可以发现低频时恒定的电阻值，到高频时显示出具有谐振点的二阶系统响应；在高频时，电容中的电介质产生了损耗，造成电容器呈现的阻抗特征只有低频时才与频率成反比；在低频时电感的阻抗响应随频率的增加而线形增加，达到谐振点前开始偏离理

想特征，最终变为电容性。这些无源元件在高频的特性都可以通过前面提到的品质因数描述，对于电容和电感来说，为了达到调谐的目的，通常希望得到尽可能高的品质因数。

1.3.2 传输线

1. 传输线的基本参数

工作频率的提高意味着波长的减小，由表 1.1 可以看出，当频率提高到 UHF 时，相应的波长范围为 10~100cm。当频率继续提高时，波长将与电路元件的尺寸相当，电压和电流不再保持空间不变，必须用波的特性来分析它们。

一根信号线与地线（或者地面）就构成了传输线，电磁波将沿信号线传播，并被严格地限制在信号线之间。具体的传输线种类很多，常用的有同轴线或同轴电缆、微带线和共面波导等。图 1.10 给出了这几种传输线的示意图。

如前所述，在射频电路设计工程师感兴趣的尺寸上，电压和电流不再是空间不变量，因此不能通过基尔霍夫电压和电流定律对宏观的传输线传输特性进行分析。但是，可以对传输线进行分割，当传输线被分割成较小的线段时，它既可以用分布参量来描述，在微观尺度上又遵循基尔霍夫定律。每个被分割的单元可以用图 1.11 所示的等效电路来描述。

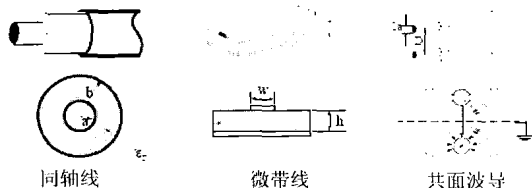


图 1.10 常用的传输线

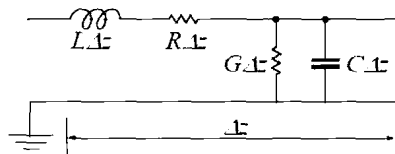


图 1.11 传输线分割单元的等效电路

由前面的内容可知，R、L、C 和 G 元件都是与频率相关的参量。很明显，这些参量的值与工作频率和应用的传输线类型有关。这种表示方法有如下的优点：

- 提供了一个清楚的、直观的物理图像。
- 有助于标准化两端网络表示法。
- 可用基尔霍夫电压和电流定律进行分析。
- 提供从微观向宏观形势扩展的建立过程。

经过计算，可以分析出前面提到的 3 种常用的传输线参量，如表 1.2 所示。

表 1.2 三种类型传输线参量

参 量	共 面 波 导	同 轴 线	微 带 线	单 位
R	$\frac{1}{\pi a \sigma \delta}$	$\frac{1}{2\pi a \sigma \delta} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{2}{w \sigma \delta}$	Ω/m
L	$\frac{\mu}{\pi} a \cosh\left(\frac{D}{2a}\right)$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$	$\mu \frac{h}{w}$	H/m
G	$\frac{\pi \sigma_{diel}}{a \cosh(D/(2a))}$	$\frac{2\pi \sigma_{diel}}{\ln(b/a)}$	$\sigma_{diel} \frac{h}{w}$	S/m
C	$\frac{\pi \epsilon}{a \cosh(D/(2a))}$	$\frac{2\pi \epsilon}{\ln(b/a)}$	$\epsilon \frac{h}{w}$	F/m

了解了传输线的基本模型和模型参量后，下面就可以分析描述传输线特性物理量——特性阻抗了。先从最简单的情况入手，假设传输线是无损耗的，即 $R=G=0$ ，则图 1.11 所示的传输线分割单元等效电路可以变为图 1.12 的形式，首先对这个电路的电压、电流特性进行分析。

由基尔霍夫定律以及电容和电感的特性可以得到：

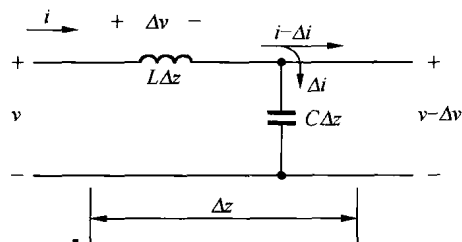


图 1.12 无损传输线分割单元的等效电路

$$L\Delta z \frac{\partial i(t, z)}{\partial t} = -\frac{\partial v(t, z)}{\partial z} \Delta z \quad (1.9)$$

$$C\Delta z \frac{\partial v(t, z)}{\partial t} = -\frac{\partial i(t, z)}{\partial z} \Delta z \quad (1.10)$$

因此

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} v(t, z) = LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} v(t, z) \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} i(t, z) = LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} i(t, z) \quad (1.12)$$

但是，更值得关心的是传输线在正弦信号激励下的稳态响应，加入正弦激励后，电路的方程为：

$$j\omega L \cdot I(z) = -\frac{d}{dz} V(z) \quad (1.13)$$

$$j\omega C \cdot V(z) = -\frac{d}{dz} I(z) \quad (1.14)$$

因此

$$\frac{d^2}{dz^2} V(z) + \omega^2 LC V(z) = 0 \quad (1.15)$$

解这个方程，最终得到的电压和电流仍然是波动形式的：

$$V(z) = Ae^{-j\beta z} + Be^{j\beta z} \quad (1.16)$$

$$I(z) = \frac{\beta}{\omega L} (Ae^{-j\beta z} - Be^{j\beta z}) \quad (1.17)$$

式中 $V(z)$ 所含两项分别为入射波和反射波， A 和 B 分别为 $z=0$ 时入射波和反射波的幅度值。式 (1.16) 和式 (1.17) 中有一个十分重要的参量 β ，它可以用式 (1.18) 来描述：

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad (1.18)$$

这个参量被称为波的相位常数 (Phase Constant)，单位为 rad/m，表示在一定频率下，行波相位沿传输线的变化情况，因此，它与波速有关。

公式 (1.16) 和 (1.17) 中入射波电压和电流分别为 $Ae^{-j\beta z}$ 和 $\frac{\beta}{\omega L} Ae^{-j\beta z}$ ，在没有反射的情况下，传输线任意一点的电压与电流的比值定义为传输线的特性阻抗 Z_0 ：

$$Z_0 = \frac{\omega L}{\beta} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.19)$$

特性阻抗可以理解为无限长传输线的输入阻抗。对于图 1.11 中描述的有损传输线，同样可以得到它的特性阻抗为：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.20)$$

通过表 1.2 中的传输线参量和式 (1.20) 便可计算出常用的 3 种传输线的特性阻抗，从而了解它们的传播特性。

2. 终端带负载的传输线分析

前面分析了无限长传输线中电压与电流的关系，但是射频电路可以看作为有限传输线段与各种分立的有源和无源元件的集合。所以，必须了解一个负载阻抗与一个长度为 l 的有限长度的传输线段相连的结构，如图 1.13 所示。在这个电路中，将研究一个沿 $+z$ 方向传播的输入电压波如何与负载阻抗相互作用。由于涉及到了电磁波的传输方向，下面将用 V^+ 表示沿 $+z$ 方向传播的入射波电压的幅度、用 V^- 表示沿 $-z$ 方向传播的反射波电压的幅度。

如图 1.13 所示，负载位于 $z=0$ 处，传输线长度为 l 。传输线上任意一点的电压都可以由式 (1.16) 给出，其中式子的第二项表示从终端负载阻抗反射到 $z<0$ 区域的值。这里引入反射系数 Γ_0 ，它表示反射与入射电压波的振幅之比：

$$\Gamma_0 = \frac{V^-}{V^+} \quad (1.21)$$

根据这个定义结果，电压波和电流波可以用反射系数表示为：

$$V(z) = V^+(e^{-j\beta z} + \Gamma_0 e^{j\beta z}) \quad (1.22)$$

$$I(z) = \frac{V^+}{Z_0}(e^{-j\beta z} - \Gamma_0 e^{j\beta z}) \quad (1.23)$$

用式 (1.22) 除以式 (1.23)，则可以得到沿 z 轴任意一点的阻抗 $Z(z)$ 作为空间函数的表达式。定义 $z = -l$ 处的总输入阻抗为 Z_{in} ，在负载 $z = 0$ 处输入阻抗为负载阻抗，则：

$$Z(0) = Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} \quad (1.24)$$

进一步，可以得到反射系数 Γ_0 ：

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1.25)$$

由式 (1.25) 可以看出，对于开路线 ($Z_L = \infty$)，反射系数为 1，也就是说反射波与入射波具有相同的极性；而对于短路线 ($Z_L = 0$)，反射波与入射波具有相反的幅度，因此 $\Gamma_0 = -1$ 。在负载阻抗与传输线的特性阻抗相等 ($Z_L = Z_0$) 时，不产生反射。如果没有反射，则说明入射电

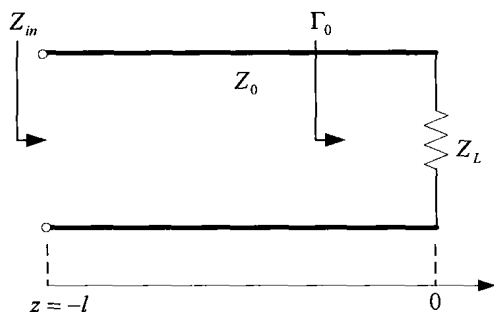


图 1.13 带终端负载的传输线模型

压波完全被负载吸收了。这种情况可以看作在 $z=0$ 处附加了第二根具有相同特性阻抗且无限长的传输线。

在距离负载 d 处坐标应为 $z=-d$ ，因此，输入阻抗由式 (1.26) 给出：

$$Z_{in}(d) = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_0 \frac{V^+ e^{j\beta d} (1 + \Gamma_0 e^{-2j\beta d})}{V^+ e^{j\beta d} (1 - \Gamma_0 e^{-2j\beta d})} \quad (1.26)$$

进一步可以得到输入阻抗与负载阻抗、传输线特性阻抗以及 d 之间的关系如式 (1.27) 所示：

$$Z_{in}(d) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta d)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta d)} \quad (1.27)$$

下面分析输出端负载为以下几种特殊情况时电路的输入阻抗。

(1) 终端短路传输线。

对于终端短路传输线，相当于终端负载阻抗 $Z_L=0$ ，则式 (1.27) 可以简化为式 (1.28)：

$$Z_{in}(d) = jZ_0 \tan(\beta d) \quad (1.28)$$

图 1.14 表示了终端短路线的输入阻抗随线长的变化情况。可以看出输入阻抗随着与负载距离的增加而呈周期性变化。在 $d=0$ 的位置，输入阻抗等于负载阻抗，其值为零；随着距离的增加，线路的阻抗变为纯虚数，而且数值随着距离的增加而增加，此时输入阻抗的绝对值为正数，表示电路呈现电感特性；当 d 达到 $1/4$ 波长时，阻抗等于无穷大，这就代表开路线情况；进一步增加距离，出现负的纯虚阻抗，它可以等效为电容特性；当距离达到一半波长时，阻抗变为零，并开始一个新的周期。

(2) 终端开路传输线。

假如 $Z_L \rightarrow \infty$ ，输入阻抗式 (1.27) 可以简化为式 (1.29)：

$$Z_{in}(d) = -jZ_0 \frac{1}{\tan(\beta d)} \quad (1.29)$$

同样，图 1.15 所示为在终端开路的情况下输入阻抗随线长的变化情况。

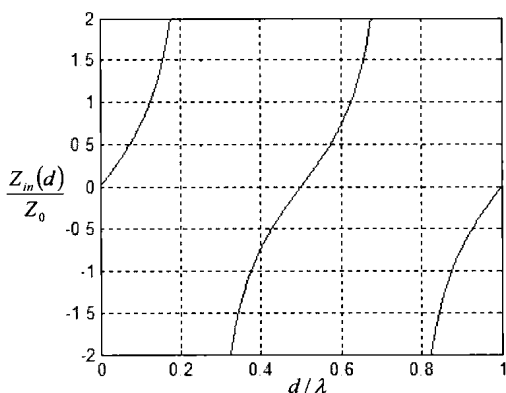


图 1.14 终端短路传输线输入阻抗特性

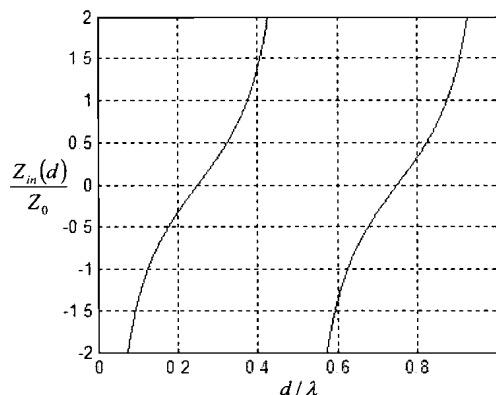


图 1.15 终端开路传输线输入阻抗特性

可以看出终端开路传输线同样是周期性的呈现出电容特性和电感特性。根据这个特点，可以很方便地用终端开路传输线来实现容性和感性阻抗。也就是说，可以用一个终端开路的