

高频电子线路

High Frequency Electronic Circuit

◆ 高瑜翔 张 杰 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高频电子线路

主 编 高瑜翔 张 杰

副主编 谭菲菲 邱红兵 王欣强 史勤刚



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以高频电子线路涉及的基础知识、基本原理和计算机仿真与工程应用设计为突出重点,基于 CDIO 工程教育思想,尽力将理论与实际紧密结合,以期培养出理论与工程设计兼备的实际应用型人才。全书主要包括绪论、谐振与小信号选频放大电路、高频功率放大电路、正弦波振荡电路、线性频谱搬移电路、角度调制与解调电路、反馈控制电路共 7 章,全面涵盖了高频电路与系统相关的各个组成部分。

为了巩固读者对基本理论的深入理解和增强学习兴趣及降低自主学习难度,本书在每章都编入了技术实践部分和使用 Multisim 软件进行计算机辅助分析与仿真内容,读者可以方便地改变有关电路与信号参数,通过仿真测试与波形观测,深入理解和分析相应电路的理论工作原理与实际工作现象。

本书既可作为应用型高等院校通信、电子信息、自动化测控与仪表等专业的教材和学习辅导用书,也可供有关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 高瑜翔, 张杰主编. —北京: 电子工业出版社, 2019.1

ISBN 978-7-121-34362-9

I. ①高… II. ①高… ②张… III. ①高频—电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 122929 号

策划编辑: 施玉新

责任编辑: 裴 杰

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

装 订: 北京虎彩文化传播有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 14.25 字数: 365 千字

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

印 次: 2019 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式: (010) 88254598, syx@phei.com.cn。

前 言

高频电子线路是通信、电子技术及其相关电类专业的一门十分重要的专业基础课程，涉及了众多的专业基础知识与概念，无论是电子通信类的重点院校，还是一般本科院校都开设有本课程。高频电子电路涉及的内容非常丰富，并具有较强的理论性、工程实践性和复杂多变的实际电路结构，这使得学生在刚开始学习时不仅在基本理论和原理部分就感到困难，更是在分析实际电路与工程设计实践时感到茫然和力不从心。所以长期以来，高频电子线路课程呈现出“既不好学，又不好教”的态势。随着时代和技术进步，单一的、枯燥的理论教学方式将逐渐淘汰，而形式生动、手段多样、引入计算机辅助的教学方式成为主流。因此，本书在保留高频电子线路课程的基本理论和原理部分的同时，为了使學生更加深入理解和掌握高频电路的理论，方便学生主动自主地学习，在每章单独编入与本章理论知识点对应的计算机辅助分析与仿真内容，学生通过计算机仿真可以在课外反复理解和掌握相关知识，这样可以寓学于乐，避免抽象单调地学习，降低自主学习的难度，从而提高学习的效率和效果。另外，为了配合卓越工程计划和 CDIO 工程实践教育的要求，书中还编写了应用实例、目标测评和技术实践部分。

由于本教材希望从教和学两个方面来共同提升教学效果，所以全书具有如下特点：

(1) 理论内容进一步精简，重点突出，主次分明。

(2) 避免烦琐的理论推导，内容由浅入深、逻辑性强，并对一些难以理解的原理和易混淆的概念进行了深入的剖析和比较分析。

(3) 理论讲授的同时重在应用设计，全书除第一章外，其余各章都给出了有关应用实例和技术实践设计环节。

(4) 为了巩固读者对基本理论的深入理解，增强学习兴趣，降低自主学习难度，本书在每章都使用 Multisim 软件对重点内容进行相关的计算机辅助分析与仿真，读者可以方便地改变有关参数来理解相应电路的工作原理。

本书是在前面出版的同名教材基础上经过全面深入修改而成，总体上由高瑜翔、张杰负责，而全书的统稿、修订和整理再版等工作主要由高瑜翔完成，全书基本编写分工如下：第 1 章由成都信息工程大学的高瑜翔老师编写，第 2 章由成都信息工程大学的高瑜翔、西南民族大学的王欣强老师、西华大学的胡宏平老师、西南石油大学的邱红兵老师共同编写，第 3 章由成都信息工程大学的谭菲菲、陈爱萍老师编写，第 4 章由成都信息工程大学的张杰老师编写，第 5 章由成都信息工程大学的高瑜翔、黄飞老师和电子科技大学成都学院微电子系史勤刚老师编写，第 6 章由成都信息工程大学的于红兵老师编写，第 7 章由成都信息工程大学的陈启兴、周杨、西南石油大学的邱红兵老师编写，全书由徐宏主审。

本教材适合作为应用型本科院校有关专业如通信工程、电子工程、自动化、测控、电

气电子、医疗电子等本科专业的通用教程，也可成为工程技术人员的参考学习用书。

非常感谢为本书提出宝贵意见和帮助的老师 and 领导，以及付出心血的所有相关工作人员。由于时间十分仓促，虽然已尽力对书中所发现的错误和不当之处进行了改正，但是难以尽善尽美，热烈欢迎各位读者批评指正，我们将继续虚心接受大家的宝贵意见与建议。

高瑜翔

目 录

第 1 章 绪论	1
本章目标	1
应用实例 军用无线电台	1
1.1 通信系统概述	2
1.1.1 通信系统及其基本组成	2
1.1.2 无线通信系统	2
目标 1 测评	3
1.2 信号与频谱、电磁波及其频段划分	3
1.2.1 典型信号及其频谱	3
1.2.2 电磁波及其频段的划分	4
1.2.3 高频与射频设计的必要性	5
目标 2 测评	6
1.3 非线性电子线路的基本概念	6
1.3.1 线性与非线性电路	6
1.3.2 非线性电路的基本特点	6
1.3.3 非线性电路的主要分析方法	7
目标 3 测评	7
1.4 计算机辅助分析仿真软件简介及非线性仿真	7
1.4.1 计算机辅助分析仿真软件简介	7
1.4.2 非线性仿真	8
本章小结	10
习题 1	11
第 2 章 谐振与小信号选频放大电路	12
本章目标	12
应用实例 电视机高频头	12
2.1 选频电路概述	13
2.2 LC 谐振回路选频特性分析	13
2.2.1 并联谐振回路	13
2.2.2 串联谐振回路	17
2.2.3 串并联谐振回路特点	17

目标 1 测评	18
2.3 阻抗变换电路	18
2.3.1 信源与负载阻抗对选频电路的影响	18
2.3.2 基本阻抗变换电路	19
目标 2 测评	21
2.4 高频小信号选频放大电路及性能参数	21
2.4.1 概述	21
2.4.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	23
2.4.3 晶体管谐振放大器	24
2.4.4 高频谐振放大器的稳定性及其提高方法	30
2.4.5 电噪声与噪声系数	31
2.5 集成谐振放大器	34
2.6 技术实践	35
2.7 计算机辅助分析与仿真	39
本章小结	42
习题 2	42
第 3 章 高频功率放大电路	44
本章目标	44
应用实例 功率放大芯片和模块	44
3.1 高频功率放大器概述	45
3.2 谐振功率放大器的工作原理	45
3.2.1 基本工作原理	45
3.2.2 谐振功率放大器的近似分析	48
3.2.3 输出功率与效率	50
目标 1 测评	51
3.3 谐振功率放大器的特性分析	52
3.3.1 谐振功率放大器的工作状态与负载特性	52
3.3.2 V_{CC} 对放大器工作状态的影响	55
3.3.3 U_{im} 和 V_{BB} 对放大器工作状态的影响	56
目标 2 测评	57
3.4 谐振功率放大器电路	57
3.4.1 直流馈电电路	57
3.4.2 滤波匹配网络	60
3.4.3 谐振功率放大器的实际电路	65
目标 3 测评	66
3.5 丁类和戊类谐振功率放大器	66
3.6 集成射频功率放大器及其应用简介	67
3.7 宽带与高功率放大器简介	69

3.7.1 传输线变压器及概述	70
3.7.2 功率合成	71
3.8 技术实践	71
3.9 计算机辅助分析与仿真	74
本章小结	77
习题 3	78
第 4 章 正弦波振荡电路	81
本章目标	81
应用实例 晶体及电视机的本振	81
4.1 反馈振荡器的工作原理	82
4.1.1 反馈振荡器振荡的基本原理	82
4.1.2 振荡的平衡条件和起振条件	83
4.1.3 振荡的稳定条件	85
4.1.4 正弦波振荡电路的组成要点	86
目标 1 测评	87
4.2 LC 振荡器	88
4.2.1 三端振荡器基本工作原理和构成法则	88
4.2.2 三端振荡器分析	89
4.2.3 集成 LC 正弦波振荡器	94
目标 2 测评	95
目标 3 测评	96
4.3 振荡器的频率和幅度稳定度	96
4.3.1 频率稳定度	96
4.3.2 幅度稳定度	97
4.4 石英晶体振荡器	98
4.4.1 石英谐振器及其特性	98
4.4.2 石英晶体振荡电路	100
目标 4 测评	101
4.5 现代高性能振荡器及其应用简介	102
4.6 技术实践	104
4.7 计算机辅助分析与仿真	105
本章小结	108
习题 4	109
第 5 章 线性频谱搬移电路	113
本章目标	113
应用实例 调幅广播收音机	113
5.1 频谱搬移及调幅基本原理	114

5.1.1	概述及其分类	114
5.1.2	调幅基本原理及分析	114
目标 1	测评	121
目标 2	测评	121
5.2	幅度调制电路	122
5.2.1	相乘器电路	122
5.2.2	低电平调幅电路	128
目标 3	测评	131
目标 4	测评	135
5.2.3	高电平调幅电路	135
5.3	调幅波的解调	137
5.3.1	检波器基本介绍	137
5.3.2	二极管包络检波电路	137
目标 5	测评	143
目标 6	测评	143
5.3.3	同步检波器	144
目标 7	测评	146
5.4	混频电路	146
5.4.1	混频原理	146
5.4.2	二极管混频电路	148
5.4.3	三极管混频电路	150
5.4.4	乘积型混频器	153
5.4.5	混频干扰	154
5.5	技术实践	156
5.5.1	调幅电路设计	156
5.5.2	振幅检波电路设计	158
5.6	计算机辅助分析与仿真	159
5.6.1	仿真电路	159
5.6.2	仿真内容	159
5.6.3	仿真调试	159
本章小结		164
习题 5		164
第 6 章	角度调制与解调电路	167
本章目标		167
应用实例	车载 MP3 FM 发射器	167
6.1	调角波的概念表述	168
6.1.1	调角信号的由来	168
6.1.2	调角波波动规律的数学表达	169

6.1.3 调角波的频谱与带宽	172
目标 1 测评	175
6.2 调频电路	175
6.2.1 调频电路的主要性能指标	175
6.2.2 直接调频电路	176
6.2.3 间接调频电路	180
6.2.4 扩展最大频偏的方法	185
目标 2 测评	186
6.3 鉴频电路	186
6.3.1 鉴频电路的主要性能指标	186
6.3.2 斜率鉴频器	187
6.3.3 相位鉴频器	189
6.3.4 限幅器	194
目标 3 测评	195
6.4 技术实践	195
6.5 计算机辅助分析与仿真	197
本章小结	198
习题 6	199
第 7 章 反馈控制电路	203
本章目标	203
应用实例 PLL 芯片及 AGC 放大模块	203
7.1 自动增益控制电路	204
7.1.1 AGC 电路的组成	204
7.1.2 平均值式 AGC 电路	205
7.1.3 延迟式 AGC 电路	205
7.2 自动频率控制电路及工作原理	206
7.3 锁相环路 (PLL)	206
7.3.1 锁相环路的基本工作原理	207
7.3.2 锁相环路的基本特性	208
7.3.3 集成锁相环路	208
7.4 技术实践	209
7.5 计算机辅助分析与仿真	210
本章小结	212
习题 7	212
参考答案	214
参考文献	219

第1章 绪 论

随着电子、通信技术不断发展和广泛应用,现代电子、通信设备已成为人们生活中不可或缺的一部分。现代电子设备和系统中涉及的电子技术主要包括信号采集技术、传输或通信技术、信号处理技术和软件等,无疑射频技术和微电子技术是它们发展的基础,虽然它们正朝着“软件化”的方向发展,但是任何现代电子设备和系统总可以划分为模拟部分和数字部分。对于无线通信系统,模拟部分主要是指高频或射频前端,完成信号的变换与频谱搬移。高频电子线路就是对模拟前端中的高频调制、解调、功放、小信号放大、滤波、本振和混频等各部分知识进行阐述和讲解。本章主要对高频电路与系统涉及的基本概念和基础知识进行介绍,还简要介绍了高频电路的有关计算机仿真软件和非线性电路基本原理和特性的仿真。

本章目标

知识:

- 理解通信系统的基本功能和作用,掌握通信系统的基本组成及其主要作用。
- 掌握无线通信系统的组成,理解无线通信系统中信号或信息变换的过程。
- 理解信号的频谱含义,掌握电磁波频段的划分。
- 理解高频电路与低频电路的主要区别,了解高频下导线、电阻、电容、电感的基本电路模型图。
- 理解非线性电路的基本概念和特征,掌握非线性电路的基本分析方法。

能力:

- 能够将高频电路的理念运用于无线通信系统相应的组成部分。
- 能够掌握频段名称、频段划分基本边界和高频的频段范围。
- 能够掌握理想与实际高频电路元件的基本模型、特性方程。
- 能够使用仿真软件,并对非线性电路基本功能与特性进行仿真。

应用实例 军用无线电台

早期无线电台主要是军用,战场上部无线电台是用众多战士的生命和鲜血来守护的,因为如果没有无线电台架起的信息桥梁,战争双方无论是谁都会陷入被动和孤立,难以赢得胜利。无线电台通过高频无线电波传送电报编码和声音等信息。发射时,原始信息首先经过电声器件转换成低频电信号,并由低频放大器放大,然后通过调制器使得高频振荡器产生的高频等幅振荡信号被低频信号所调制,从而产生高频调制信号;已调制的高频振荡信号经高频功率放大器放大后送入发射天线,转换成无线电波辐射出去。接收时,无线电台通过天线和小信号放大、滤波后接收到相应的高频无线信号,再通过解调获取通信对方

的相关信息。



军用无线电台（源自 Internet 网络）

1.1 通信系统概述

1.1.1 通信系统及其基本组成

众所周知，通信的含义是信息的传递，其基本目的就是由信源通过电或光等方式向信宿传递消息。最基本的传输或通信系统的简化模型如图 1.1 所示。它主要包括发送设备、信道、接收设备三个部分，另外还包括信源和信宿，以及噪声和干扰部分。

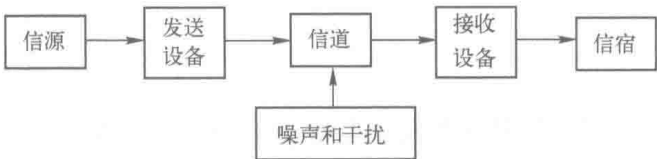


图 1.1 基本通信系统的简化模型

信源是信息的提供者，其表现形式有多种，如语音、图像、音乐、图片、文字、电码等。信源产生的信号随着时间而变化，一般称为基带信号，通常不适宜直接在信道中传输，需要发送设备对其进行某种变换与处理，将它转换成既载有信源信息，又便于在信道中有效传输的频带信号，这种变换称为调制。发送设备的主要作用就是实现调制和放大，其输出的频带信号称为已调信号。

信道是信号的传输介质，对于电信号来说，它可以分为有线和无线两种，有线包括普通的金属导线、双绞线、同轴电缆和微带线等；无线包括大气、水、地表和宇宙空间。不同的信道其频率特性是不同的，适合不同的应用场合。

接收设备与发送设备相对应，其作用是将信道中的频带信号接收后进行反变换，将频带信号转变成基带信号，即解调，随后将发送端发送的基带信号送给信宿，由信宿将电信号转变成人们可以理解的信息或消息。信宿通常包括扩音器、显示器等。

信号在传输过程中，无论是在发送设备还是在接收设备抑或是在信道中，都会受到噪声和干扰的污染与影响，使得接收端的信号与发送端相比存在失真，如何减小信号在传输过程中产生的失真始终是通信系统设计的主要任务。图中将噪声和干扰集中表现在信道中，是大多数通信系统模型的一种表示方法，有利于简化系统的分析。

1.1.2 无线通信系统

通信系统总可以分为无线和有线通信两类，而无线通信的世界更为精彩，它是当今通信技术发展水平集中而典型的代表。图 1.2 是一个无线通信系统的典型构成框图。

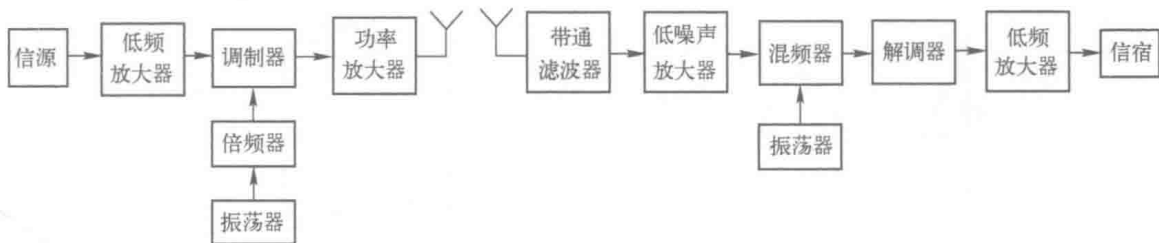


图 1.2 无线通信系统典型构成框图

无线或移动通信系统主要是通过大气和宇宙空间等以无线的方式实现信息的传输和通信，手机就是典型的移动通信系统终端。无线通信系统的特点就是必须将原始信息载荷到高频或射频频率上，通过天线以电磁波传送到接收端，并在接收端卸载原始信息，从而完成通信。整个系统主要包括产生载荷信息的高频载波的振荡器、实现信息装载的调制器、提供传输能量的高频功率放大器、有效选择或调谐载波并抑制噪声的带通滤波器、放大高频小信号的低噪声放大器、改变高频载波频率的倍频器和混频器以及卸载原始信息的解调器等。上述所有这些都属于高频电子线路或射频电路设计的主要内容，所以高频电子线路是设计无线和移动通信系统的基础。

目标 1 测评

无线通信系统的构成中为何需要振荡器？它有何作用？

1.2 信号与频谱、电磁波及其频段划分

1.2.1 典型信号及其频谱

在通信系统中实际传递的是各种形式的电信号，而这些电信号是通过某种转换设备把对应的信息转换成相应的随时间变化的电流或电压。通常这些实际的电信号在时域都具有较为复杂的波形，它们都包含许多频率成分，在频域内占有一定的频率范围，存在一定的频谱结构，频谱图可以方便地表示信号中含有的频率成分以及它们所占的比例。通常，信号的频谱可以通过傅里叶变换得到。下面给出几种典型信号的有关波形和频谱的表达式及其相应的曲线（图 1.3）。

(1) 余弦信号，即

$$f(t) = \cos \omega_0 t \quad F(\omega) = \pi \delta(\omega - \omega_0) + \pi \delta(\omega + \omega_0)$$

(2) 矩形脉冲信号，即

$$f(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad F(\omega) = \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega \tau}{2}\right)$$

(3) 周期脉冲信号。周期为 T_0 ，宽度为 τ ，高度为 A 的矩形脉冲的频谱为

$$F(\omega) = 2\pi \frac{A\tau}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{n\omega_0 \tau}{2}\right) \delta(\omega - n\omega_0)$$

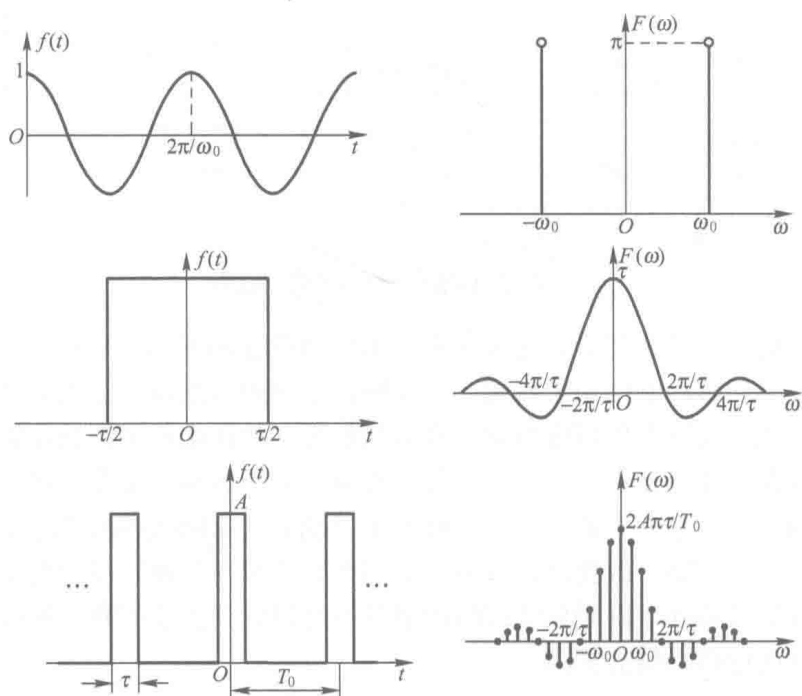


图 1.3 几种典型信号的波形和频谱

1.2.2 电磁波及其频段的划分

在无线和移动通信系统中，电磁波充当了运送信息的载体。电磁波本质上是天线中流动的高频电流在其周围空间激起的随时间变化的交变电磁场，它是一种由近及远地以波的形式传播的电磁能。

电磁波在真空中的传播速度恒为光速，即 $c=3\times10^8\text{ m/s}$ ，在大气中的速度也接近于光速。任何无线电波都有两个基本参数，即频率 (f) 和波长 (λ)，频率表示电磁波在每秒钟交变的次数，其单位为赫兹 (Hz)；波长表示电磁波在一个振荡周期内传播的距离，其单位为米 (m)。

频率和波长满足

$$c=f\lambda$$

可见电磁波的频率和波长一一对应，当其传播速度恒定时，频率和波长成反比，即频率越高波长越短，或波长越长频率越低。

电磁波包括的范围十分广泛，可见光、红外线、紫外线和 X 射线等属于频率比较高的一类电磁波，常见的广播电视和移动通信中使用的电磁波频率相对较低，通常称为无线电波。

根据频率或波长的大小，无线电波可以划分为不同的波段或频段，表 1.1 给出了无线电波各波段的名称、波长和频率的参考范围。

表 1.1 无线电波各波段的名称、波长和频率的参考范围

波段名称	频率范围	波长范围
超长波	3~30 kHz (甚低频, VLF)	100~10 km
长波	30~300 kHz (低频, LF)	100~1 km
中波	300~3000 kHz (中频, MF)	1000~100 m

续表

波段名称	频率范围	波长范围
短波	3~30 MHz (高频, HF)	100~10 m
超短波	30~300 MHz (甚高频, VHF)	10~1 m
分米波	300~3000 MHz (超高频, UHF)	100~10 cm
厘米波	3~30 GHz (特高频, SHF)	10~1 cm
毫米波	30~300 GHz (极高频, EHF)	10~1 mm

需要指出的是, 表 1.1 中给出的波长和频率范围仅是一个参考划分值, 电磁波的特性在各波段之间的衔接处并无明显差别。

目前, 国内的中波广播频段为 525~1605 kHz; 短波广播频段为 2~24 MHz; 调频广播的频段为 88~108 MHz; 广播电视使用的频段范围是 470~958 MHz; 移动通信使用 900 MHz 和 1800 MHz 频段。

另外, 本书中高频的频率范围非常宽, 而非表 1.1 中的狭义划分值。通常认为只要电路尺寸比工作波长小得多, 仍可以采用集总参数来描述和实现, 都属于高频范畴。一般认为高频与射频的频率范围是 3 MHz~3 GHz。

1.2.3 高频与射频设计的必要性

在无线通信系统典型的构成框图中, 已经知道高频与射频电路是整个系统的模拟前端, 同时由于信道复用和天线尺寸的要求, 使它成为任何无线系统中必不可少的组成部分。高频与射频电路的设计在现代无线通信整个系统设计中将花费相当大的工作量和财力投入。

高频与射频部分的性能直接决定和影响了整个通信系统的工作状况和性能, 不管基带部分设计得多好, 如果没有卓越的高频与射频前端, 整个系统便无法正常工作。

高频与射频电路部分是无线通信系统中设计与实现的难点, 由于高频与射频部分中器件的非线性、时变性、不稳定性和模型的不准确性, 以及受分布与寄生参数的影响, 给高性能的高频与射频电路设计与实现造成相当大的困难, 所以在实际设计时很大程度上依赖于设计人员长期积累的调测经验。

高频电路和低频电路存在重大区别。在低频信号下, 电阻 (R)、电容 (C) 和电感 (L) 都可以视为单一理想器件; 但在高频信号下, 集总参数的电阻、电容和电感的频率响应特性与低频时的完全不同, 它们都表现为一个复杂的 RLC 网络的频率特性, 即使是一根简单的导线也会呈现出复杂的频率响应。图 1.4 所示为导线、电阻、电容、电感在高频信号下的等效电路。

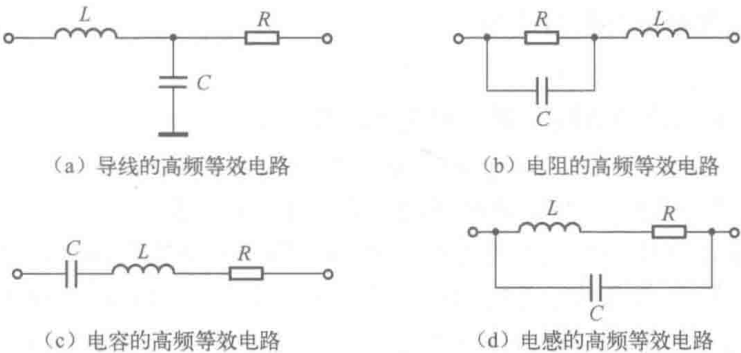


图 1.4 导线、电阻、电容、电感的高频等效电路

对于有源器件,如二极管和三极管,在高频信号下其等效电路和模型与低频时的差别也很大,在设计时必须准确建立相应的模型并借助 EDA 工具方能实现较为有效的设计。

目标 2 测评

高频电路设计和实现为何较难?如何才能设计出高性能的高频电路?

1.3 非线性电子线路的基本概念

1.3.1 线性与非线性电路

线性电路是指全部由线性或处于线性工作状态的元器件组成的电路,线性电路的输入/输出关系或伏安特性曲线为线性函数;电路中只要含有一个元器件是非线性的或处于非线性工作状态,则称为非线性电路,非线性电路的输入/输出关系或伏安特性曲线为非线性函数。

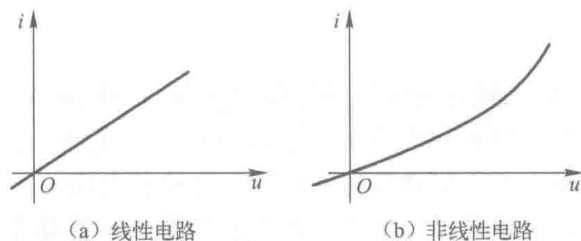


图 1.5 线性与非线性电路的伏安特性曲线

图 1.5 所示为一种线性与非线性电路的伏安特性曲线,图 1.5 (a) 属于线性电路,其伏安特性曲线是一条直线,其特性参数如电导(曲线的斜率)是恒定的,电路的输出电流随外加电压成正比例变化;图 1.5 (b) 所示为非线性电路,其伏安特性曲线不再是一条直线,电路的输出电流随外加电压不再成正比例变化,电路呈现

的电导值(曲线斜率)随外加电压大小变化而变化,特别是在大信号作用下,输出的信号波形必将产生畸变和失真,所以在输出信号中产生了新的频率成分,这是非线性电路的一个普遍现象。在高频或射频电路中,除了谐振电路和高频小信号放大器“如低噪声放大器”外,高频功放、振荡器、调制器、解调器、混频器和反馈控制电路等均属于非线性电路。

1.3.2 非线性电路的基本特点

对于图 1.5 (b) 所示的非线性电路特性曲线,使用二次曲线来模拟,可以方便地研究非线性电路的一些特点。

令非线性电路的伏安特性曲线为

$$i(u) = ku^2 \quad (1.1)$$

式中, k 为常数,它对应的曲线斜率称为交变电导,即

$$g = i'(u) = 2ku \quad (1.2)$$

g 随着外加电压变化而变化,即 g 是时变的,这是非线性电路的一个基本特性。

众所周知,线性电路中叠加定理是恒成立的,即当多个信号同时作用于线性电路时,可以分别计算每个信号各自单独作用时的响应,然后将每个信号的响应相加即得到总的响应,这是线性电路中常用的分析方法。但是对于非线性电路,叠加定理是否还成立呢?下面将进行分析。

设有两个信号 u_1 和 u_2 同时作用于非线性电路, 由式 (1.1) 可得输出为

$$i(u) = k(u_1 + u_2)^2 = ku_1^2 + ku_2^2 + 2ku_1u_2 \quad (1.3)$$

若根据叠加定理, 则输出为

$$i(u) = ku_1^2 + ku_2^2 \quad (1.4)$$

显然, 式 (1.3) 中比式 (1.4) 多了 u_1 和 u_2 的乘积项, 所以叠加定理在非线性电路中不再适用, 这是非线性电路的另一个基本特点。

若令 $u_1 = U_1 \cos \omega_1 t$, $u_2 = U_2 \cos \omega_2 t$, 将它们代入式 (1.3) 中, 可得

$$\begin{aligned} i(u) &= k(u_1 + u_2)^2 \\ &= kU_1^2 \cos^2 \omega_1 t + kU_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2kU_1U_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t \\ &= \frac{1}{2}k(U_1^2 + U_2^2) + kU_1U_2 [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] + \\ &\quad \frac{1}{2}kU_1^2 \cos 2\omega_1 t + \frac{1}{2}kU_2^2 \cos 2\omega_2 t \end{aligned} \quad (1.5)$$

由式 (1.5) 可知, 输出信号中包含有直流成分、频率 ω_1 与 ω_2 的和差分量及其二次谐波 $2\omega_1$ 与 $2\omega_2$, 这与线性电路不会产生新的频率成分完全不同, 所以产生新的频率成分是非线性电路的又一个特点。

1.3.3 非线性电路的主要分析方法

在分析非线性电路时可以采用图解法和解析法。图解法比较直观明了, 但是精确性较差, 在实际的电路分析中, 通常采用工程近似解析法。工程近似解析法就是根据实际工程的情况, 对器件和电路进行一定程度的、合理的近似, 以获得相对准确和有效的结果。常用的近似分析方法有折线法、幂级数法和开关函数法等, 将在以后各章分别予以讨论。

在小信号作用下, 当工作点选取适当, 为了简化分析, 也可以按照线性电路的分析方法来分析非线性电路。

目标 3 测评

高频电路中非线性电路有何作用?

1.4 计算机辅助分析仿真软件简介及非线性仿真

1.4.1 计算机辅助分析仿真软件简介

EDA (Electronic Design Automation) 技术在电子产品的设计、加工、调试等方面得到十分广泛的应用, 其中电子电路的计算机辅助分析与仿真软件有很多, 如 SystemView、LabView、Proteus 等, 本书采用加拿大图像交互技术公司 (Interactive Image Technologies, IIT) 推出的电路仿真软件 Multisim, 它延续了同一家公司的优秀仿真软件 EWB (Electronics Work Bench) 的发展进程。IIT 公司从 EWB 6.0 版本开始, 将专用于电路级仿真与设计的模块命名为 Multisim, 意指其仿真功能强大, 能完成原理图的设计输入、器件建模、电路仿真分析和电路测试等功能。