

普通高等教育“十三五”规划教材

高频电子线路

GAOPIN DIANZI XIANLU

主 编 高瑜翔



國防工業出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十三

五

高频电子线路

主 编 高瑜翔

副主编 张 杰 胡宏平 邱红兵 王欣强

参 编 陈爱萍 王春圃 于红兵 陈启兴

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

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重点,立足于 CDIO 工程教育思想,以期培养出理论与工程设计兼具的实际应用型人才。全书主要内容包括绪论、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所有相关的组成部分。

为了巩固读者对基本理论的深入理解、增强学习兴趣以及降低自主学习难度,本书还在每一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参数来深入理解相应的理论结果。

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。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 高瑜翔主编. —北京:国防工业出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-118-10961-0

I. ①高… II. ①高… III. ①高频-电子线路-高等学校-教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146082 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市鼎鑫印务有限公司印刷

新华书店经售

※

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 336 千字

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

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,无论是电子类的重点院校,还是一般本科院校都开设有本课程。高频电路涉及的内容非常广泛,并具有较强的理论性、工程实践性,加之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,而且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被淘汰,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,为了使学更加深入地理解和掌握高频电路的理论,方便学生主动自主地学习,在每一章单独编入与本章理论知识点相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堂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,为了满足卓越工程计划和 CDIO 工程实践教学的要求,书中新增了应用实例、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,所以全书具有以下特点:

(1) 理论内容精要,重点突出,主次分明。

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

(3) 在理论讲授的同时重在应用设计,全书除第 1 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,本书在每一章节都使用 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的理论和原理。

本书由高瑜翔担任主编,负责全书的统稿、修订和整理。其中,第 1 章由成都信息工程大学的高瑜翔编写,第 2 章由高瑜翔、西南民族大学的王欣强、西华大学的胡宏平、西南石油大学的邱红兵共同编写,第 3 章由成都信息工程大学的陈爱萍编写,第 4 章由成都信息工程大学的张杰编写,第 5 章由成都信息工程大学的王春圃和高瑜翔编写,第 6 章由成都信息工程大学的于红兵编写,第 7 章由成都信息工程大学的陈启兴编写。

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工作人员。由于水平所限,书中错误和不当之处在所难免,欢迎各位读者批评指正。

高瑜翔
2015 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
本章目标	1
应用实例 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	16
2.2.3 串并联谐振回路特点	18
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	38
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 功放芯片和模块	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	51
3.3.1 谐振功率放大器的工作状态与负载特性	52
3.3.2 U_{CC} 对放大器工作状态的影响	54
3.3.3 U_{im} 和 U_{BB} 对放大器工作状态的影响	55
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	59
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 宽带高频功率放大器	69
3.7.1 传输线变压器	69
3.7.2 功率合成技术	71
3.7.3 宽带高频功率放大器实用电路	72
3.8 技术实践	73

3.9 计算机辅助分析与仿真	75
本章小结	79
习题3	79
第4章 正弦波振荡电路	82
本章目标	82
应用实例 晶体及电视机的本振	82
4.1 反馈振荡器的工作原理	83
4.1.1 反馈振荡器振荡的基本原理	83
4.1.2 振荡的平衡条件和起振条件	84
4.1.3 振荡的稳定条件	86
4.1.4 正弦波振荡电路的组成要点	87
目标1 测评	88
4.2 LC 振荡器	89
4.2.1 三端振荡器基本工作原理和构成法则	89
4.2.2 三端振荡器分析	90
4.2.3 集成 LC 正弦波振荡器	95
目标2 测评	96
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	97
4.3.2 幅度稳定度	98
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	102
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	106
本章小结	109
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	120
目标2 测评	120
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	127
目标3 测评	130
目标4 测评	133
5.2.3 高电平调幅电路	134
5.3 调幅波的解调	135
5.3.1 检波器基本介绍	135
5.3.2 二极管包络检波电路	136
目标5 测评	141
目标6 测评	142
5.3.3 同步检波器	142
目标7 测评	144
5.4 混频电路	144
5.4.1 混频原理	144
5.4.2 二极管混频电路	146
5.4.3 三极管混频电路	148
5.4.4 乘积型混频器	151
5.4.5 混频干扰	152
5.5 技术实践	153
5.5.1 调幅电路设计	154
5.5.2 振幅检波电路设计	155
5.6 计算机辅助分析与仿真	156
5.6.1 仿真电路	156
5.6.2 仿真内容	156
5.6.3 仿真调试	157
本章小结	161
习题5	161
第6章 角度调制与解调电路	164
本章目标	164
应用实例 车载MP3 FM发射器	165
6.1 调角波的概念表述	165
6.1.1 调角信号的由来	165
6.1.2 调角波波动规律的数学表达	166
6.1.3 调角波的频谱与带宽	169
目标1 测评	173
6.2 调频电路	173
6.2.1 调频电路的主要性能指标	173
6.2.2 直接调频电路	173
6.2.3 间接调频电路	177
6.2.4 扩展最大频偏的方法	182
目标2 测评	183

6.3 鉴频电路	183
6.3.1 鉴频电路的主要性能指标	183
6.3.2 斜率鉴频器	184
6.3.3 相位鉴频器	185
6.3.4 限幅器	191
目标3 测评	192
6.4 技术实践	192
6.5 计算机辅助分析与仿真	193
本章小结	195
习题6	195
第7章 反馈控制电路	199
本章目标	199
应用实例 PLL 芯片及 AGC 放大模块	199
7.1 自动增益控制电路	200
7.1.1 AGC 电路的组成	200
7.1.2 平均值式 AGC 电路	201
7.1.3 延迟式 AGC 电路	201
7.2 自动频率控制电路及工作原理	202
7.3 锁相环路	202
7.3.1 锁相环路的基本工作原理	203
7.3.2 锁相环路的基本特性	204
7.3.3 集成锁相环路	204
7.4 技术实践	205
7.5 计算机辅助分析与仿真	206
本章小结	208
习题7	208
参考文献	210

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,掌握高频下导线、电阻、电容、电感的基本模型图。
- 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。
- 能够掌握高频电路的基本模型并用于理解高频电路。
- 能够使用仿真软件对非线性电路基本特性进行仿真。

应用实例 无线电台



(源自 Internet 网络)

早期无线电台主要是军用,战场上的一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。

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,通信的含义就是信息的传递,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。它包括信源、发送设备、信道、接收设备和信宿。

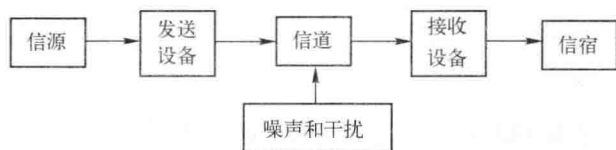


图 1.1 通信系统的简化模型

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的信息,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,适合于不同的应用场合。

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的集中而典型的代表。图 1.2 是一个无线通信系统的典型构成框图。

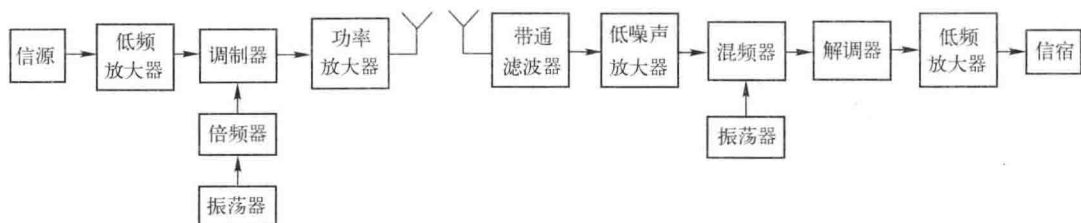


图 1.2 无线通信系统典型构成框图

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

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

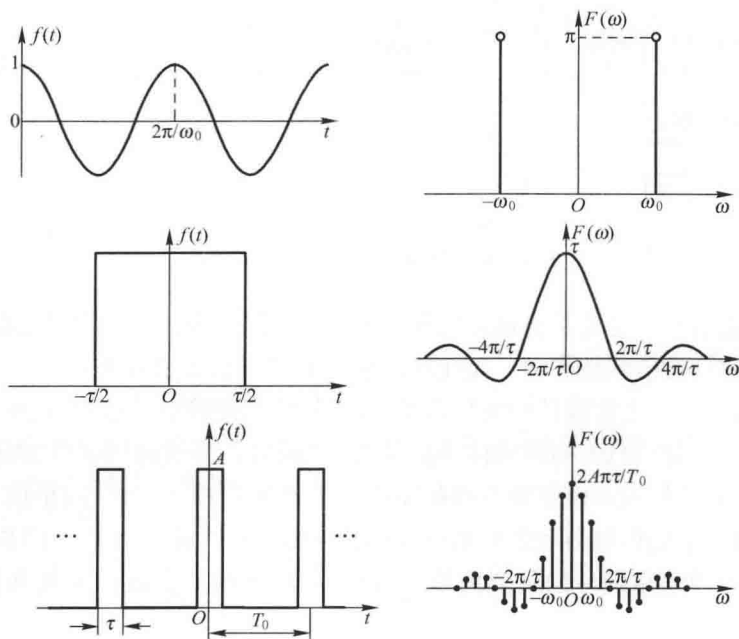


图 1.3 几种典型信号的波形和频谱

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 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,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,通常称之为无线电波。

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 无线电波各波段名称、波长和频率的参考划分

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

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,以及电路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。

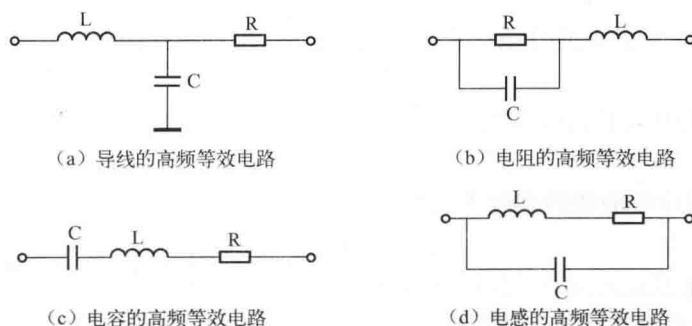


图 1.4 导线、电阻、电容、电感的高频等效电路

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 示出了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。

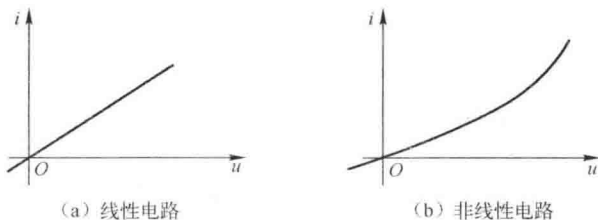


图 1.5 线性与非线性电路的一种伏安特性曲线

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

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

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 Technoligics, 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 WorkBench)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。

Multisim 继承了 EWB 以往版本中可对电路图直接操作的直观特点,同时又加强了软件的仿真测试和分析功能,还大大扩充了元件库中仿真元件的数量,特别是增加了若干个与实际元件相对应的建模精确的真实仿真元件模型,使得仿真设计的结果更精确、更可靠;不仅如此,新增的元件编辑器还可以用来自行创建并修改用户所需的元件模型。

Multisim 以其广泛的适用性和良好的可靠性受到电路工程师的欢迎,它适用于各种应用方式的常见电路形式的仿真,模拟或数字电路均可。它继承了 EWB 5.0 操作的逼真性,使得用户宛如置身一个实验室中,它的元器件库和虚拟仪器面板与实际器件和仪器一样形象、逼真,但又比实验室中操作起来更加灵活,可以随时调换元件、改变参数、调试仪器。用户无需在不同的界面上进行复杂的切换,在仿真电路这个主界面上,只需用鼠标单击不同的部位即可开出相应的小窗口,以此实现元件参数的调整或仪器的调试,而仪器的显示也可在窗口中实现。另外,绘制电路图需要的元器件、电路仿真需要的测试仪器均可直接从屏幕上选取。

简而言之,Multisim 实现了双重意义上的仿真,它既能够对电路工作原理进行仿真,又能够最大限度地模仿电路实验的操作过程。因此,它也就成为了广受欢迎的有效而方便的电路仿真软件。

Multisim 目前的常用版本有 8.0 ~ 11.0。为方便读者在不同版本下的使用,本书中的电路仿真文件是在 Multisim 8.0(教育版)下仿真通过的。更高的版本由于向下兼容,实现这些电路的仿真实验不存在障碍。

1.4.2 非线性仿真

为了说明非线性特点,在此通过非线性器件二极管来验证非线性电路中叠加定理不再成立的结论,相应的仿真电路如图 1.6 所示。图中使用了两个电压源,其频率分别为 9 MHz 和 10 MHz,幅度为 1 V,分为 3 个电路,连接如图中所示,其中两个电路是用于两个电压源各自单独作用时的信号波形仿真,输出的波形如图 1.7 所示,图 1.8 所示为图 1.7 中两个波形的叠加结果;第三个电路是上述两个信号源叠加后再作用于二极管的输出波形仿真,输出波形如图 1.9 所示,可以看出输出的波形并不等于单独作用时的两个波形的叠加,从而验证了非线性电路中叠加定理并不成立的特性。

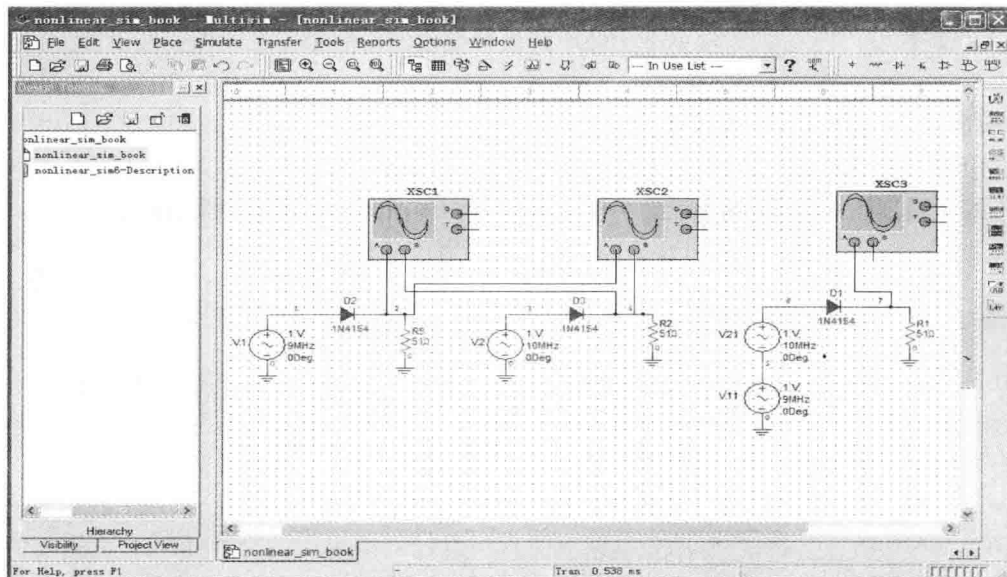


图 1.6 非线性特性中叠加定理验证电路仿真图