

高等院校教材

高频电子线路

主 编 高瑜翔

副主编 王春圃 张瑾 胡宏平



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

高频电子线路

主编 高瑜翔

副主编 王春圃 张 瑾 胡宏平

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以高频电子线路涉及的基础知识、基本原理和实际应用设计为重点,立足于培养理论与工程设计兼具的实际应用型人才。全书共分8章,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、反馈控制电路和无线收发系统设计简介,全面涵盖了高频电路与系统的相关知识。

为了增强读者对基本理论的深入理解和学习兴趣,本书还在每一重点章节末给出了相关的 Matlab 仿真分析的源代码,读者可以方便地改变有关参数来理解相应的结果。

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:科学出版社,2008

(高等院校教材)

ISBN 978-7-03-022631-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 104742 号

责任编辑:毛莹 潘继敏 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年12月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年12月第一次印刷 印张:17 3/4

印数:1—4 000 字数:224 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《高频电子线路》编委会名单

主 编 高瑜翔

副主编 王春圃 张 瑾 胡宏平

参 编 陈爱萍 张 杰 余红兵 邱红兵

王欣强 肖 波 李华兵

前 言

高频电子线路是通信、电子技术及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本课程。高频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,这使得学生不仅在学习理论时感到困难,更主要的是在分析实际电路与工程实践时感到茫然和力不从心。如何让学生较好地、高效地学习、理解和掌握这门课程,是我们任课老师多年来的心愿和追求。根据长期的教学实践,对于普通院校的学生必须要有一本内容适当、难易适中、叙述清晰、传授知识的手段多样、形式生动的好教材,这正是编写本书的出发点。

承蒙科学出版社的诚挚邀请,本书编写队伍以成都信息工程学院为主,联合了西南交通大学、西南民族大学、西南石油大学、西华大学和成都理工大学等高校通信与电子类专业长期从事高频电子线路课程教学工作的老师,共同完成了本教材的编写。

由于本教材希望从教和学两个方面来共同提高教学效果,全书具有如下特点:

- (1) 内容精要,重点突出,主次分明,并具有系统性;
- (2) 避免烦琐的理论推导,讲解由浅入深、逻辑性强,并对一些难于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,全书在重点部分都给出了有关设计实例;
- (4) 从学习的角度,为了增强读者对基本理论的深入理解和学习兴趣,本书在每一重点章节末给出了相关的 Matlab 仿真分析的源代码,读者可以方便地改变有关参数来理解相应的结果。

本书由高瑜翔担任主编,并负责统稿和整理,第 1、8 章由成都信息工程学院的高瑜翔老师编写,第 2 章由西南民族大学的王欣强老师、西华大学的胡宏平老师共同编写,第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章分别由成都信息工程学院的陈爱萍、张杰、王春圃和余红兵老师编写,第 7 章由西南石油大学的邱红兵老师编写,西南交通大学的张瑾老师和肖波老师编写了全书的 Matlab 仿真代码。另外成都理工大学工程技术学院的李华兵老师参加了部分校对工作。

本书是在所有参编老师长期使用的讲稿和讲义的基础上整理,并参考了相关的同类教材编写而成的,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、大气电子、医疗电子等的通用教材,也可供有关工程技术人员

参考。

非常感谢为本书提出宝贵意见和为本书编写给予帮助的老师 and 领导,以及付出心血的所有工作人员。由于时间仓促,书中难免存在错误和不当之处,欢迎各位读者批评指正。

高瑜翔

2008年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统概述	1
1.1.1 通信系统及其基本组成	1
1.1.2 无线通信系统	2
1.2 信号与频谱、电磁波及其频段划分.....	2
1.2.1 典型信号及其频谱	2
1.2.2 电磁波及其频段的划分	4
1.2.3 高频与射频电路设计的必要性	5
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
本章小结.....	8
习题.....	8
第 2 章 谐振与小信号选频放大电路	10
2.1 选频电路概述.....	10
2.2 LC 谐振回路选频特性分析	11
2.2.1 并联谐振回路	11
2.2.2 串联谐振回路	14
2.2.3 串并联谐振回路特点	15
2.3 阻抗变换电路.....	15
2.3.1 信源与负载阻抗对选频电路的影响	15
2.3.2 基本阻抗变换电路	16
2.4 选频电路的计算与设计.....	17
2.5 高频小信号选频放大电路.....	19
2.5.1 概述	19
2.5.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	22
2.5.3 晶体管谐振放大器	23
2.5.4 高频谐振放大器的稳定性.....	31

2.5.5 提高放大器稳定性的方法	34
2.6 集成谐振放大器	35
本章小结	37
附录 LC 并联谐振回路的 Matlab 分析源代码	37
习题	42
第3章 高频功率放大电路	44
3.1 高频功率放大器概述	44
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	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	56
3.3.3 U_{im} 和 V_{BB} 对放大器工作状态的影响	57
3.4 谐振功率放大器电路与设计	59
3.4.1 直流馈电电路	59
3.4.2 滤波匹配网络	62
3.4.3 谐振功率放大器的电路设计实例	69
3.4.4 谐振功率放大器的实际电路	70
3.5 丁类和戊类谐振功率放大器	71
3.6 集成射频功率放大器及其应用简介	73
3.7 宽带高频功率放大器	75
3.7.1 传输线变压器	76
3.7.2 功率合成技术	78
3.7.3 宽带高频功率放大器实用电路	79
本章小结	80
附录 谐振功率放大器的 Matlab 分析源代码	81
习题	83
第4章 正弦波振荡电路	86
4.1 反馈振荡器的工作原理	86
4.1.1 反馈振荡器振荡的基本原理	86
4.1.2 振荡的平衡条件和起振条件	88
4.1.3 振荡的稳定条件	90
4.1.4 正弦波振荡电路的组成要点	91

4.2 LC 振荡器	93
4.2.1 三端振荡器基本工作原理和构成法则	94
4.2.2 三端振荡器分析	95
4.2.3 集成 LC 正弦波振荡器	101
4.2.4 三端振荡器设计	102
4.3 振荡器的频率和幅度稳定度	104
4.3.1 频率稳定度	104
4.3.2 幅度稳定度	106
4.4 石英晶体振荡器	106
4.4.1 石英谐振器及其特性	107
4.4.2 石英晶体振荡电路	109
4.5 实用振荡器简介	111
本章小结	114
附录 振荡过程仿真	114
习题	117
第 5 章 线性频谱搬移电路	124
5.1 频谱搬移及调幅基本原理	124
5.1.1 概述及其分类	124
5.1.2 调幅基本原理与分析	125
5.2 幅度调制电路	134
5.2.1 相乘器电路	134
5.2.2 低电平调幅电路	141
5.2.3 高电平调幅电路	153
5.2.4 调幅电路设计	155
5.3 调幅波的解调	157
5.3.1 检波器的基本介绍	157
5.3.2 二极管包络检波电路	158
5.3.3 同步检波器	166
5.3.4 振幅检波电路设计	169
5.4 混频电路	170
5.4.1 混频原理	170
5.4.2 二极管混频电路	172
5.4.3 三极管混频电路	174
5.4.4 乘积型混频器	178
5.4.5 混频干扰	179

本章小结	182
附录 线性频谱搬移电路的 Matlab 分析源代码	184
习题	190
第 6 章 角度调制与解调电路	195
6.1 调角波的概念	195
6.1.1 调角信号的由来	195
6.1.2 调角波的数学表示	196
6.1.3 调角波的频谱与带宽	200
6.2 调频电路	204
6.2.1 调频电路的主要性能指标	204
6.2.2 直接调频电路	204
6.2.3 间接调频电路	208
6.2.4 扩展最大频偏的方法	217
6.3 鉴频电路	218
6.3.1 鉴频电路的主要性能指标	218
6.3.2 斜率鉴频器	218
6.3.3 相位鉴频器	222
6.3.4 限幅器	229
本章小结	230
附录 角度调制信号的 Matlab 分析源代码	231
习题	234
第 7 章 反馈控制电路	239
7.1 概述	239
7.2 自动增益控制电路	240
7.2.1 工作原理	240
7.2.2 自动增益控制电路	242
7.3 自动频率控制电路	245
7.3.1 工作原理	245
7.3.2 AFC 电路的应用	246
7.4 锁相环路	247
7.4.1 工作原理	248
7.4.2 基本环路方程	249
7.4.3 锁相环路的捕捉与跟踪	251
7.4.4 锁相环路的基本特性	252
7.4.5 集成锁相环路及其应用	253

7.4.6 锁相频率合成器	256
本章小结	258
习题	258
第8章 无线收发信系统设计简介	260
8.1 发射系统设计	260
8.1.1 发射机结构	260
8.1.2 发射机的性能指标	261
8.2 接收系统设计	262
8.2.1 接收机结构	262
8.2.2 接收机的性能指标	265
本章小结	266
习题	266
参考答案	268
参考文献	272

第 1 章 绪 论

随着电子、通信技术的不断发展和广泛应用,现代电子、通信设备正日益成为人们生活中常用的不可缺少的一部分。而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,射频技术和微电子技术无疑是它们发展的基础,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。

1.1 通信系统概述

1.1.1 通信系统及其基本组成

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。

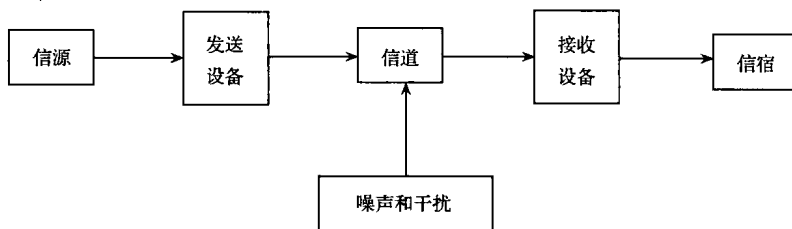


图 1.1 通信系统的简化模型

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、地表和宇宙空间等。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、接收设备,还是在信道中,都会受到噪声和干扰的污染与影响,使得接收端的信号同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 1.1 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通信和有线通信两类,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 是一个典型无线通信系统的构成框图。

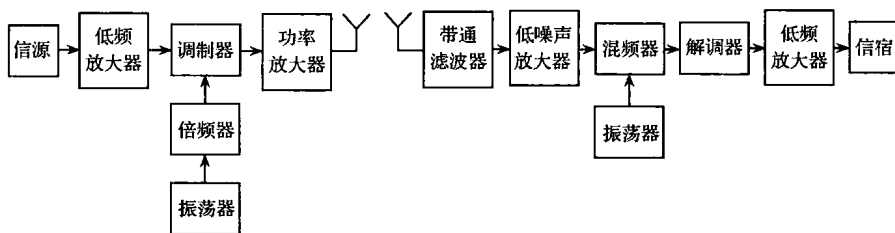


图 1.2 典型无线通信系统的构成框图

无线(或移动)通信系统主要是通过大气和宇宙空间等媒介以无线的方式实现信息的传输和通信,我们使用的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,通过天线以电磁波的形式传送到接收端,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。上述所有这些部分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(或移动)通信系统的基础。

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

换设备把对应的消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,频谱图可以很方便地用来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这一数学工具得到,下面给出几种典型信号的有关波形和频谱表达式以及它们相应的曲线,如图 1.3 所示。

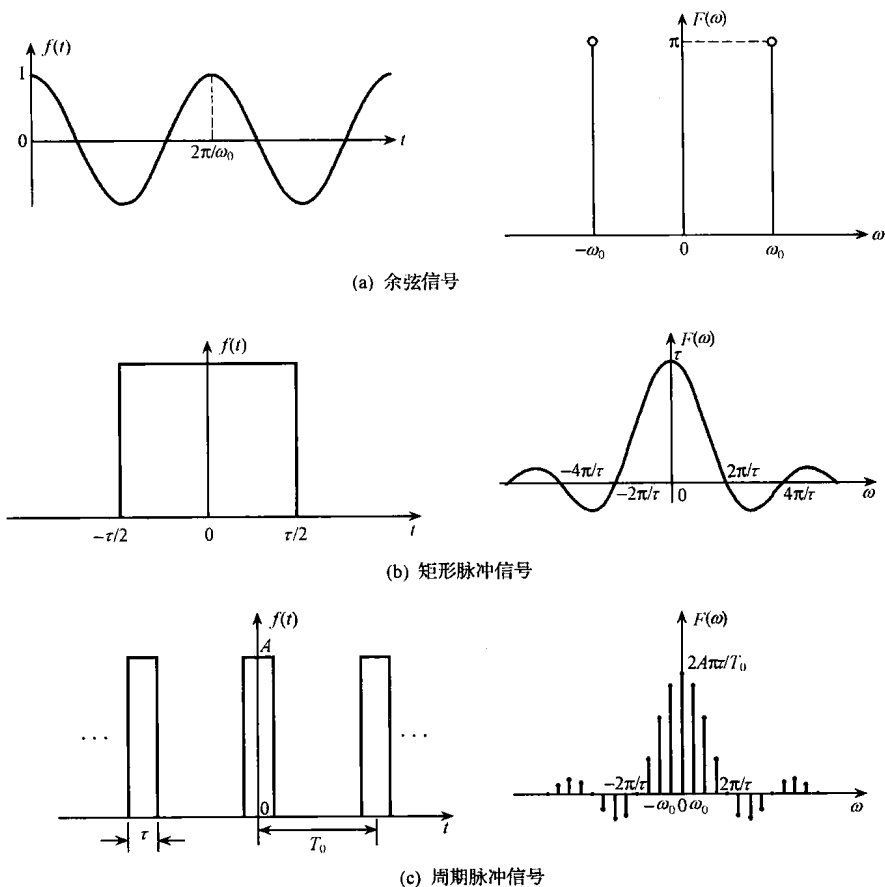


图 1.3 几种典型信号的波形和频谱图

(1) 余弦信号

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

(2) 矩形脉冲信号

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

(3) 周期脉冲信号

周期为 T_0 , 宽度为 τ , 高度为 A 的矩形脉冲信号的频谱为

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

1.2.2 电磁波及其频段的划分

在无线(或移动)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 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (米/秒),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)。频率和波长满足如下关系式:

$$c = f\lambda$$

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
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(特高频——UHF)	100~10 cm
厘米波	3~30 GHz(超高频——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 900MHz 和 1800MHz 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。我们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 30MHz~3GHz。

1.2.3 高频与射频电路设计的必要性

在无线通信系统典型的构成框图中,我们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的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,不管基带部分设计的多好,如果没有卓越的高频与射频前端,整个系统必无法正常工作。

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,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,均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)都可以视为单一的理想器件;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 为导线、电阻、电容、电感在高频信号下的等效电路图。

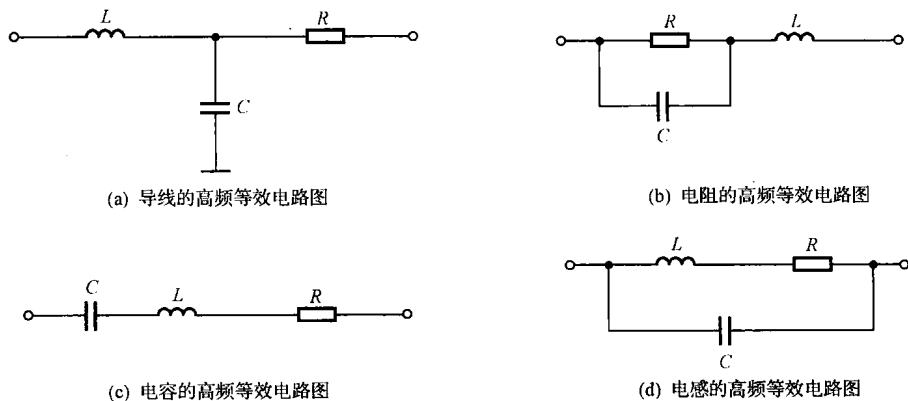


图 1.4 导线、电阻、电容、电感的高频等效电路图

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。

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

所谓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变化;图 1.5(b)为非线性电路,其伏安特性曲线不再是一条直线,电路的输出电流不再随外加电压成正比变化,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,所以在输出信号中引起了新的频率成分,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。

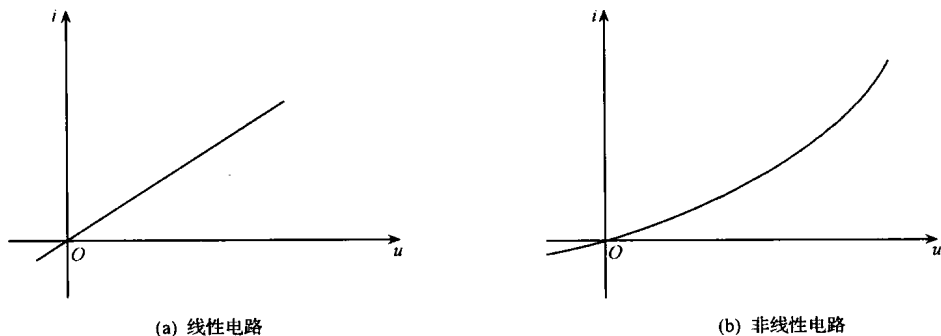


图 1.5 线性与非线性电路的一种伏安特性曲线

1.3.2 非线性电路的基本特点

对于图 1.5(b)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。

非线性电路的伏安特性曲线为如下表达式: