



面向21世纪

高职高专系列教材

信号与线性 网络基础

◎王晓虹 郭小莉 龚美霞 编

◎金毓良 审



机械工业出版社
China Machine Press

面向 21 世纪高职高专系列教材

信号与线性网络基础

王晓虹 郭小莉 龚美霞 主编

金毓良 审



机械工业出版社

本教材根据高职高专电子技术专业系列教材编委会拟定的《信号与线性网络基础》教材编写大纲编写, 教学时数为 60~80 学时。

全书共分 5 章: 信号与网络分析的基本概念、谐振电路、双端口网络、滤波器和传输线。本书编写立足于高职高专电子技术类专业的培养目标, 针对高职高专教育的特点, 着重于基本概念和基本分析方法的论述及应用, 注重理论知识的实用性和适度性, 避免不必要的推导与计算。内容深入浅出, 叙述简明扼要, 知识丰富, 内容既系统全面, 又有深度适当的专业知识, 每章均给出典型的题例分析, 并配置了数量适当的习题, 便于学生自学和复习。

本书可作为高职高专电子技术类专业的教材, 也可供电子工程技术人员学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

信号与线性网络基础/王晓虹等主编. —北京: 机械工业出版社, 2001.11

面向 21 世纪高职高专系列教材

ISBN 7-111-08472-1

I. 信… II. 王… III. ①信号系统—高等学校: 技术学术—教材②网络分析—高等学校: 技术学术—教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 067416 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 汪汉友 版式设计: 霍永明 责任校对: 韩 晶

封面设计: 雷明顿 责任印制: 路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mmB5·3.875 印张·173 千字

0 001—5 000 册

定价: 12.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

NAIP/07

面向 21 世纪高职高专

电子技术专业系列教材编委会成员名单

顾问	王文斌	陈瑞藻	李 奇	杨 杰	
主任委员	曹建林				
副主任委员	穆天保	张中洲	张福强	巩志强	董维佳
	祖 炬	华永平	任德齐		
委员	张锡平	刘美玲	杨元挺	刘 涛	马 彪
	华天京	冯满顺	周卫华	崔金辉	曹 毅
	朱华贵	孙吉云	孙津平	吴元凯	孙心义
	张红斌	饶庆和	苟爱梅		
秘书长	胡毓坚				
副秘书长	邓 红				

前 言

本教材是根据高职高专电子技术系列教材编委会拟定的《信号与线性网络基础》教材编写大纲编写的。

全书包括信号与网络分析的基本概念、谐振电路、双端口网络、滤波器和传输线 5 章内容,本书与《电工基础》课程相衔接,按 60~80 学时编写。本书主要研究分析信号及线性电路,介绍各种常用的线性电路的分析方法和计算方法,为进一步学习电子线路和相关专业课程奠定必要的理论基础。考虑到高职高专教育的特点,对谐振电路、双端口网络、滤波器和传输线部分的内容仅介绍了基本的知识和基本理论,强调物理概念,避免烦琐的数学推导。

《信号与线性网络基础》课程与《电工基础》课程在内容及分析方法上有着密切的联系,两者都是以线性时不变电路(在本书中简称为线性电路)为主要分析对象。前者偏重于复杂信号(多频率正弦信号的线性组合)作用于线性电路的分析,而后者着重于单频率正弦信号作用于线性电路的分析;前者侧重研究输出与输入之间的关系,后者侧重研究电路内部各支路的电流和各元件上的电压。在分析电路时,前者主要分析在非单一频率的信号源作用下电路的工作特性和失真问题,参数 ω 仅作为一个重要的自变量或参变量,而後者的信号源则是单一频率 ω 的正弦信号,电路中各处的电流或电压都是同一频率的正弦量,仅在幅度和相位上有所不同,因而在计算电流和电压时, ω 不再出现。对于这些差别读者应给予注意。总之,本课程在分析电路时侧重于研究电路的频率特性,即不同频率的信号在电路中的响应。

本书的第 1 章和第 5 章由郭小莉同志编写,第 2 章和第 3 章由王晓虹同志编写,第 4 章由龚美霞同志编写,最后由王晓虹同志统编全书,金毓良主审。限于编者水平,加上时间仓促,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

出版说明

积极发展高职高专教育,完善职业教育体系,是我国职业教育改革和发展的一项重要任务。为了深化职业教育的改革,推进高职高专教育的发展,培养 21 世纪与我国现代化建设要求相适应的,并在生产、管理、服务第一线从事技术应用、经营管理、高新技术设备运作的高级职业技术应用型人才,尽快组织一批适应高职高专教学特色的教材,已成为各高职高专院校的迫切要求。为此,机械工业出版社与高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会联合组织了全国 40 多所院校的骨干教师,共同研究开发了一批计算机专业、电子技术专业和机电专业的高职高专系列教材。

各编委会确立了“根据高职高专学生的培养目标,强化实践能力和创新意识的培养,反映现代职业教育思想、教育方法和教育手段,造就技术实用型人才为立足点”的编写原则。力求使教材体现“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。

本套系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业、机电专业教材编委会分别会同各院校第一线专业教师针对高职高专计算机、电子技术和机电各专业的教学现状和教材存在的问题开展研讨,尤其针对目前高职高专教学改革的新情况,分别拟定各专业的课程设置计划和教材选题计划。在教材的编制中,将教学改革力度比较大、内容新颖、有创新精神、比较适合教学、需要修编的教材以及院校急需、适合社会经济发展的新选题优先列入选题规划。在广泛征集意见及充分讨论的基础上,由各编委会确定每个选题的编写大纲和编审人员,实行主编负责制,编委会通过责任编委和主审对教材进行质量监控。

担任本套教材编写的老师们都是来自各高职高专院校教育第一线的教师,他们以高度的责任感和使命感,经过近一年的努力,终于将本套教材呈现在广大读者面前。由于高职高专教育还处于起步阶段,加上我们的水平和经验有限,在教材的选题和编审中可能出现这样那样的问题,希望使用这套教材的教师和学生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业的繁荣而共同努力。

高职高专系列教材编委会
机械工业出版社

目 录

出版说明

前言

第 1 章 信号与网络分析的基本

概念 1

1.1 信号的基本概念 1

1.1.1 信号及其描述 1

1.1.2 信号的分类 1

1.1.3 信号的频谱 2

1.2 信号传输系统 7

1.2.1 系统的概念 7

1.2.2 网络的频率响应 7

1.2.3 信号的不失真传输条件 9

1.2.4 无线电通信系统 11

1.2.5 无线电波段的划分 13

1.3 小结 13

1.4 习题 14

第 2 章 谐振电路 15

2.1 概述 15

2.2 串联谐振电路 16

2.2.1 串联谐振电路的频率特性 17

2.2.2 串联谐振 18

2.2.3 串联谐振电路的幅频曲线和相频
曲线 21

2.2.4 串联谐振电路的性能指标 23

2.2.5 信号源内阻及负载电阻对 Q 值
的影响 25

2.3 并联谐振电路 26

2.3.1 并联谐振电路的频率特性 26

2.3.2 并联谐振 28

2.3.3 并联谐振电路的电压幅频曲线和
相频曲线 30

2.3.4 信号源内阻及负载电阻对 Q 值
的影响 30

2.4 复杂并联谐振电路 32

2.4.1 并联谐振电路的两个基本
公式 32

2.4.2 双电感和双电容并联谐振电路的
谐振频率和谐振阻抗 33

2.4.3 部分接入的等效转换 35

2.5 耦合谐振电路 40

2.5.1 基本概念 40

2.5.2 串联型互感耦合双调谐电路的二
次侧电流频率特性 41

2.5.3 其他类型的耦合谐振电路 44

2.6 小结 45

2.7 习题 48

第 3 章 双端口网络 51

3.1 概述 51

3.2 双端口网络的网络方程和
网络参数 54

3.2.1 阻抗方程和 Z 参数 54

3.2.2 传输方程和 A 参数 56

3.2.3 实验参数 59

3.3 双端口网络的网络函数 60

3.4 镜像参数 62

3.5 双端口网络的等效电路 67

3.6 阻抗匹配网络 70

3.6.1 电抗相移器 70

3.6.2 衰减器 71

3.7 小结 73

3.8 习题 73

第 4 章 滤波器 75

4.1 概述 75

4.2 滤波器的传通条件 77

4.3 K 式滤波器 78

4.3.1 低通滤波器 78

4.3.2 高通、带通和带阻滤波器	81	5.5 无损耗传输线	102
4.4 其他类型滤波器	84	5.5.1 无损耗线的特性阻抗和传输 常数	103
4.4.1 m 式滤波器	84	5.5.2 无损耗线上的驻波和驻 波系数	104
4.4.2 RC 滤波器	89	5.6 终端匹配、短路、开路和接 任意负载的无损耗线	105
4.4.3 晶体滤波器	90	5.6.1 终端匹配的无损耗线	105
4.4.4 陶瓷滤波器	92	5.6.2 终端短路的无损耗线	106
4.4.5 声表面波滤波器	92	5.6.3 终端开路的无损耗线	109
4.5 小结	93	5.6.4 终端接任意负载的无损 耗线	110
4.6 习题	95	5.6.5 $\lambda/4$ 传输线阻抗变换器	111
第 5 章 传输线	96	5.7 小结	112
5.1 一般概念	96	5.8 习题	113
5.2 传输线的分布参数和分布参 数电路	97	参考文献	115
5.3 传输线方程	99		
5.4 均匀传输线上的波	100		

第 1 章 信号与网络分析的基本概念

1.1 信号的基本概念

1.1.1 信号及其描述

当我们走在马路上，就会看到交通路口的信号灯，它是光信号；同时我们可以听汽车的鸣笛声，它是声信号。我们在电视机前所收看到的电视节目信号是通过电视台发射的电磁波传递的，这种电磁波与电视台要传送的电信号相对应。电信号是随时间变化的信号，它们通常是电压或者是电流，在某些情况下也可以是电荷或磁通。无论哪一种信号，都是信息的载体，是信息的一种表现形式。信息就是人们要传告的某种事件。各种各样的信息转换成信号方能被高效可靠地远距离传输和进行各种处理。

信号的特征可以从两个方面来描述，即时间特性和频率特性。信号可写成数学表达式，即时间 t 的函数，它具有一定的波形，因而表现出波形的时间特性，如出现时间的先后、持续时间的长短、重复周期的大小及时间变化的快慢等；另一方面，任意信号在一定条件下总可以分解为许多不同频率的正弦分量，因而具有频率特性，如含有大小不同的频率分量，主要频率占有不同的范围等。

信号的形式之所以不同，就因为它们各自有不同的时间特性和频率特性，而信号的时间特性和频率特性有着对应的关系，不同的时间特性将导致不同的频率特性的出现。

1.1.2 信号的分类

对于各种信号，可以从不同的角度进行分类。

1. 确定信号和随机信号

按时间函数的确定性划分，信号可以分为确定信号和随机信号两类。确定信号：比如一正弦信号 $f(t) = \sin \omega t$ ，对应 t 时刻，信号 $f(t)$ 有一个确定的值；再比如周期脉冲信号，对应某一时刻，信号也有确定的值。从上例中可以归结出确定信号是指一个可以表示为确定函数的信号。

随机信号：比如我们通常看到的电视接收系统，当我们在没有看到某一频道电视节目之前，对该频道所发射或传递的信息并不知道。因为，对接受者来说，如果传输的是确定信号，就不可能由它得到任何新的信息，也就失去了传输的意义，我们也就不用再看电视了。例如我们收听某一广播电台的节目时，系统所传输的信号是随机的。在信号传输过程中，除了人们所需要的带有信息的信号外，往往还夹杂着干扰的噪声，它们通常有更大的随机性，因而严格地说，传输中的信号都是随机的。所谓随机信号就是指信

号不是一个确定的时间函数, 当给定某一时间值时, 其函数值并不确定, 而只知道此信号取某一数值的概率。但是在一定条件下, 随机信号也表现出某些确定性, 通常把在较长时间内比较确定的随机信号近似地看成确定信号, 使分析过程得以简化, 便于在工程上应用。

2. 连续信号和离散信号

信号按自变量 t 的取值是否连续, 可以分为连续时间信号和离散时间信号, 简称连续信号和离散信号。

所谓连续信号是指在所讨论的时间内, 对任意时刻除若干不连续点外都为有定义的信号, 通常用 $f(t)$ 表示。图 1-1 中信号 $f(t)$ 的自变量 t 的取值是连续的, 所以信号 $f(t)$ 是连续信号。所谓离散信号是指它的时间自变量 t 只在某些不连续的规定时刻 t_k 有定义, 而在其他时刻没有定义的信号, 通常用 $f(t_k)$ 表示。图 1-2 中信号 $f(t_k)$ 只在 $t_k = 0, -1, 1, -2, 2, \dots$ 等离散时刻有函数值, 而在其他时刻没有定义, 所以信号 $f(t_k)$ 是离散信号。

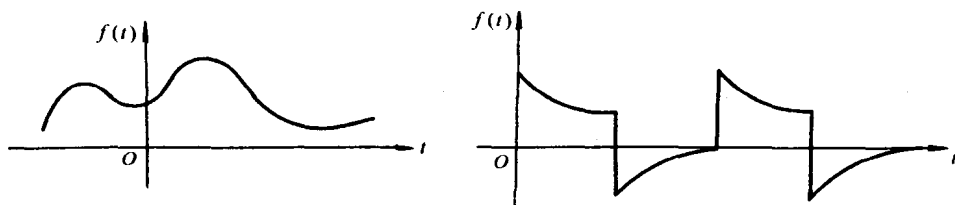


图 1-1 连续时间信号

连续信号和离散信号是现实中客观存在的两大类信号。例如, 记录在家用录音机磁带或留声机唱片上的音乐信号, 电话线上传输的语音信号都是连续时间信号。描述每年人口总和情况或工厂每月产量的信号都是离散时间信号。

连续信号有时也称为模拟信号, 而离散信号有时称为数字信号。

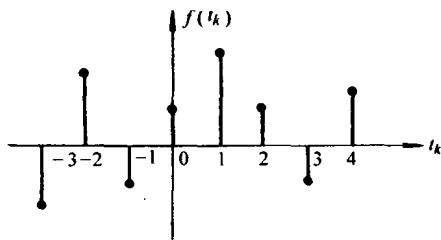


图 1-2 离散时间信号

3. 周期信号和非周期信号

按信号(函数)的周期性划分, 确定信号又可以分为周期信号和非周期信号。

周期信号(无论是连续信号还是离散信号)都满足 $f(t + nT) = f(t)$, 其中 T 是信号的周期, n 取整数。不满足上述关系的信号称为非周期信号。

1.1.3 信号的频谱

信号除了具有时间特性外, 还具有频率特性。例如, 轮船的汽笛声和火车的汽笛声不同, 就是因为它们的频率不一样。前者的频率低, 因而声音低沉; 后者的频率较高, 因而听起来高亢。

任何一个波形比较复杂的信号，都可以利用傅立叶分析方法将其分解为许多正弦函数之和或积分，也就是说，具有复杂波形的信号可以看成是由许多不同频率的正弦（或余弦）分量所组成。例如，某一以 T 为周期的非正弦信号 $f(t)$ 可以写为：

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega t - \phi_n) \quad (1-1)$$

式中， $a_0/2$ 为信号的直流分量， $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ 称为信号的基波（角）频率。 $n=1$ 的正弦分量，称为 $f(t)$ 的基波分量， $n>1$ 后的正弦分量称为 $f(t)$ 的 n 次谐波分量。 A_1 、 A_2 、 A_3 …… A_n 为各个频率分量的振幅， ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 …… ϕ_n 为各个频率分量的相位。

为了能既方便又明白地表示一个信号中包含有哪些频率分量及各分量所占的比重怎样，就采用了称为频谱图的表示方法。用一些不同长度的线段来分别代表 $f(t)$ 的各频率分量的振幅（或相位），然后将这些线段按频率高低依次排列起来，如图 1-3 所示。这种图就称为频谱图。图中每一条线段（谱线）代表了 $f(t)$ 的一个频率分量，其高度代表该频率分量的振幅（或相位），线段（谱线）所在的横坐标的位置代表该频率分量的频率。图 1-3 中，表示信号各分量振幅与频率关系的图称为信号的幅频图，表示信号各分量相位与频率关系的图称为信号的相频图，如果没有特别说明，通常所说的频谱图指幅频图。信号的频谱包含了信号的全部信息。频谱是信号在频率域中表示，它集中反映了信号的频率特性。例如，从频谱中我们可以看出信号包含有哪些频率分量，各分量的振幅和相位以及整个信号所占有的频率范围等等。

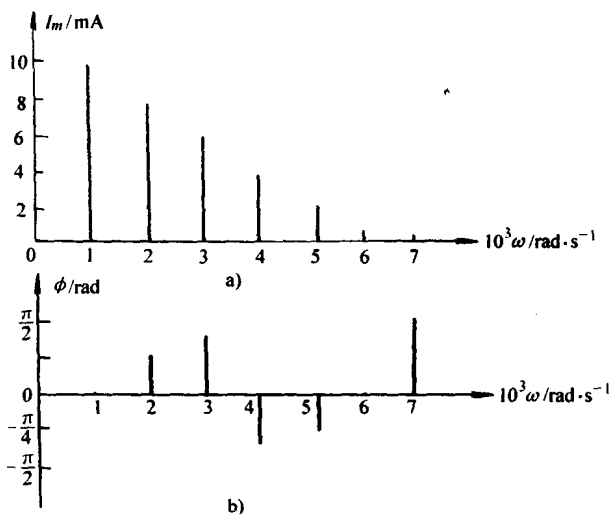


图 1-3 例 1-1 中信号的幅频图和相频图

a) 幅频图 b) 相频图

有了信号频谱的概念，就可以在频域表示信号和分析信号，从而实现从时域到频域的转变。

【例 1-1】 已知一周期信号为

$$\begin{aligned}
 i(t) = & 5 + 10\sin 10^3 t + 8\sin(2 \times 10^3 t + \frac{\pi}{4}) + 6\sin(3 \times 10^3 t + \frac{\pi}{3}) \\
 & + 4\sin(4 \times 10^3 t - \frac{\pi}{3}) + 2\sin(5 \times 10^3 t - \frac{\pi}{4}) + 0.5\sin 6 \times 10^3 t \\
 & + 0.1\sin(7 \times 10^3 t + \frac{\pi}{2})
 \end{aligned}$$

单位为毫安(mA)，试画出该信号的频谱图。

解：该信号的频谱图，如图 1-3 所示。

从图 1-3 可以看出周期信号频谱的几个特点。第一，这种频谱由不连续的谱线组成，每一条谱线代表一个频率分量，所以这种频谱称为不连续频谱或离散频谱。第二，这种频谱的每一条谱线只能出现在基波频率 Ω 的整数倍频率上，频谱中不可能存在任何频率为基波频率非整数倍的分量。第三，各条谱线的高度（即谐波分量的振幅），总的趋势是随着谐波次数的增高而减小。频谱的这 3 个特点分别称为频谱的离散性、谐波性和收敛性，具有普遍意义。

一般而言，信号分解的表达式 1-1 有无穷多项，由于频率越高的分量，振幅越小，也就是说，信号的功率或能量大部分集中在较低频率范围内。因此在实际当中常常将频率高于某一数值以后的那些分量忽略不计，因而一个信号的表达式只取有限项就够了。因此，许多实际信号只占据有限的频段，这个频段称为该信号的频谱宽度或频带宽度，其大小为信号频段内的最高频率 $f_{\max}$ 减去最低频率 $f_{\min}$ 。

例如，在上例中谐波振幅最大值为 10mA，若以最大振幅的 1/10 为标准，振幅在 1mA 以下的谐波忽略不计，可得

$$\omega_{\min} = 0 \text{ rad/s}, \quad \omega_{\max} = 5 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

$$\text{即} \quad f_{\min} = 0 \text{ Hz}, \quad f_{\max} = 796 \text{ Hz}$$

则信号的频率范围为 0~796Hz，频带宽度为 796Hz。

再比如，由实验表明，在传输语言信号时，只传输 300~3400Hz 的频率分量就足以保证语言清晰，而在传输音乐时，只传输 5000Hz 以下的频率分量就相当满意了。用于无线电广播的声频信号频率范围为 50~4500Hz。

在无线电通信中，传递信息的媒介不是导线而是空间电磁波。在通信过程中，先将欲传送的信息变为相应变化的电压或电流信号，经过发射天线将电信号转换成电磁波辐射出去，经过空间传播到达接收天线处，由接收天线再将接收到的电磁波转换为相应变化的电信号，送入接收机。

实际上，低频率的电信号不可能以电磁波的形式从天线有效地辐射到空间去，只有当送到发射天线上的电信号频率足够高，即波长足够短，短到能与天线的尺寸相比拟时，才会有足够的电磁能辐射出去。上述的声频范围所对应的波长大约从几十千米到几千千米，要制造能辐射这种波长的天线显然是不可能的。而且即使有可能把这种低频信号发射出去，各个电台所发出的信号，也将在空间混杂起来，使接收者无法选择出所要接收的信号。因此，要想不用导线传送信号，只能借助于高频电磁波，由它将低频信号“携带”到空间去。不同的电台可以采用不同频率的高频电磁波，这样，接收者只需利用一个谐振电路之类的选频网络，就能把所需电台的信号接收下来，避免了互相干

扰。

高频电磁波携带低频信号,是通过用低频信号控制等幅高频正弦信号的某一参数(振幅、频率或相位),使这一参数按低频信号的规律变化来实现的。这种用低频信号控制等幅高频正弦信号的过程称为调制。当被控制的是高频信号的幅度时,这种调制称为幅度调制,或简称调幅。同样,当被控制的是高频信号的频率或相位时,则分别称为频率调制或相位调制,简称调频或调相。经过调制后的高频信号称为已调波信号。而用来调制高频信号的低频信号称为调制信号,被调制的等幅高频信号起着运载信号的作用,称为载波信号。载波的频率一般从 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^9 \text{ Hz}$ 。

下面,以调幅波为例来说明无线电信号的一个重要特性。若设载波信号为等幅的正弦波,其初相位为零,并用下式表示:

$$i_1(t) = I_{mc} \sin 2\pi f_c t$$

式中 I_{mc} 、 f_c 分别代表载波信号的振幅和频率。

若要传送的低频信号为简单的余弦波(这里低频的含义是从广义角度上说,指大大低于载波频率的信号频率 F ,其实 F 的绝对值也可能并不低),则可用下式表示:

$$i_2(t) = I_{m\Omega} \cos 2\pi Ft$$

式中 $I_{m\Omega}$ 、 F 分别代表低频信号的振幅和频率。

若现在要进行调制,即用低频信号控制载波信号的振幅值,也就是说,调幅波的瞬时振幅值应按低频信号的规律去变化,所以调幅波的瞬时振幅值为:

$$I_m(t) = I_{mc} + I_{m\Omega} \cos 2\pi Ft = I_{mc}(1 + m \cos 2\pi Ft) \quad (1-2)$$

式中, $m = \frac{I_{m\Omega}}{I_{mc}}$ 称为调幅系数,它的数值通常为 $0 < m \leq 1$ 。

由式(1-2)可以直接写出调幅波的数学表达式为:

$$i_3(t) = I_m(t) \sin 2\pi f_c t = I_{mc}(1 + m \cos 2\pi Ft) \sin 2\pi f_c t \quad (1-3)$$

调幅波的波形如图 1-4 所示。左边是波形图,右边是频谱图。

若将式(1-3)利用三角公式展开可得:

$$\begin{aligned} i_3(t) &= I_{mc}(1 + m \cos 2\pi Ft) \sin 2\pi f_c t \\ &= I_{mc} \sin 2\pi f_c t + m I_{mc} \cos 2\pi Ft \sin 2\pi f_c t \\ &= I_{mc} \sin 2\pi f_c t + \frac{1}{2} m I_{mc} \sin 2\pi(f_c + F)t + \frac{1}{2} m I_{mc} \sin 2\pi(f_c - F)t \end{aligned} \quad (1-4)$$

由上式可见,这个调幅信号是由 3 个正弦分量所组成。第 1 项为载波(或载频)分量,它的频率为 f_c 。第 2 和第 3 项称为边频(或旁频)分量,它们的频率分别为 $f_c + F$ 和 $f_c - F$,其振幅都是载频分量的 $m/2$ 倍。频率为 $f_c + F$ 的边频分量又称为上边频分量,频率为 $f_c - F$ 的边频分量又称为下边频分量。由图 1-4c 右边的频谱图可以看出:这 3 个分量分布在 $f_c - F$ 到 $f_c + F$ 的频段内,或者说,这个调幅信号占据了以载波频率 f_c 为中心、宽度为 $2F$ 的频带。

上例说明了调制信号只有一个频率的情形。实际上,无论语言还是音乐都是一个复杂的非正弦波,它由许多不同频率的正弦分量 F_1 、 F_2 、 F_3 …… F_n 组成。因此,用它

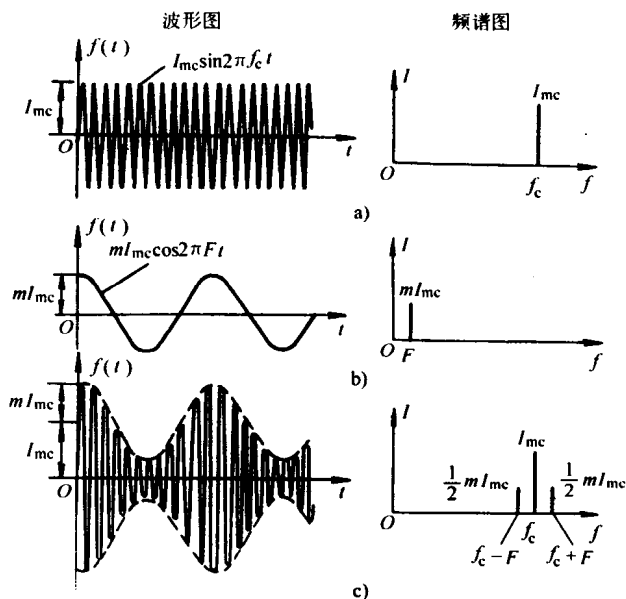


图 1-4 调幅信号的波形与频谱

- a) 高频信号的波形及频谱 b) 低频信号的波形及频谱
c) 调幅信号的波形与频谱

去调制高频信号后, 根据上面的分析可以推知, 在载频 f_c 两边有许多对边频分量: $f_c \pm F_1$ 、 $f_c \pm F_2 \cdots f_c \pm F_n$, 其中 $(f_c - F_n)$ 到 $(f_c - F_1)$ 的频率范围叫下边带, $(f_c + F_1)$ 到 $(f_c + F_n)$ 的频率范围叫上边带。总的频带宽度为 $2F_n$, 即 2 倍于调制信号的最高频率。调制信号为非正弦周期信号的调幅波的频谱图如图 1-5 所示。

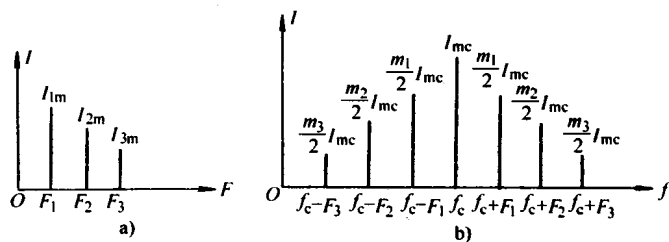


图 1-5 非正弦周期信号及其调制的调幅波的幅频图

- a) 调制信号的幅频图 b) 调幅波的幅频图

由图 1-5 可知, 调幅波的频带宽度 (简称带宽) 是由调制信号的频带宽度决定的。例如, 无线电调幅广播的带宽为 9kHz, 通常说中央人民广播电台的频率是 540kHz, 指的是它的载波频率, 而它发射的无线电波将占据 535.5~544.5kHz 的频率范围。电视信号的频带较宽, 约为 6MHz, 它的载波频率也较高, 约在 48~233MHz。

不同的无线电信号具有不同的载波频率, 并都占有一定宽度的频带。例如, 在无线电广播中, 中央人民广播电台第一套节目采用的载波频率有 540kHz、639kHz、756kHz 等, 它们的频带宽度都在 9kHz 左右。

1.2 信号传输系统

1.2.1 系统的概念

在无线电技术领域内，信号、网络 and 系统是 3 个互相联系又互有区别的基本成分。信号是运载信息的工具。网络（也称为电路）是对信号加工处理的具体结构，它研究的问题是：一定结构和参数的网络所具有的特性，或者为实现某种特性，网络应具有的结构和参数。系统（这里只讨论电系统）是指由一些元器件组成的具有某种功能的总体。它可能是某个具体的网络（如滤波器）也可能是多功能的复杂设备（如通信系统）。系统研究的问题是：当给系统加一输入信号，其输出信号的情况；或为使系统具备某种功能（如选频），它应具有的传输特性。相对地说，系统关心的是全局性问题，而网络关心的是局部性问题。

系统和网络的含义尽管不完全相同，但对简单的系统，特别是在讨论系统的基本理论时，所谓系统常常就是指网络本身。因此在本书讨论的范围内，系统与网络二者互相通用。

通常将施加于系统的输入信号称为激励，这里用 $f(t)$ 表示，将系统的输出信号称为响应，用 $y(t)$ 表示。 $f(t)$ 与 $y(t)$ 的对应关系用箭头表示： $f(t) \rightarrow y(t)$ ，是指当系统的激励为 $f(t)$ 时，响应为 $y(t)$ 。

一个系统如果满足均匀性和迭加性的要求，则称该系统为线性系统。

均匀性是指激励增大 k 倍时，响应也增大 k 倍，即

$$kf(t) \rightarrow ky(t)$$

迭加性是指当有几个激励同时作用于系统时，系统的总响应等于每个激励单独作用时产生的响应之和，即

$$f_1(t) + f_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$$

系统的线性特性可表示为

$$k_1 f_1(t) + k_2 f_2(t) \rightarrow k_1 y_1(t) + k_2 y_2(t)$$

1.2.2 网络的频率响应

既然信号可分解为许多不同频率的正弦分量之和，那么，信号对系统的作用也就是这些分量的共同作用。根据系统的线性特性，所有这些正弦分量共同作用于线性系统（网络）所产生的响应就等于各个正弦分量产生的响应之和。而单一频率的正弦信号（电压或电流）作用于线性电路的响应可采用熟悉的相量法求得。

【例 1-2】网络如图 1-6 所示， $R = 1\Omega$ ， $C = 0.5F$ ，输入信号电压 $u_S(t) = 10\sin\Omega t + 6\sin 2\Omega t + 4\sin 3\Omega t$ ，其中 $\Omega = 1\text{rad/s}$ ， $u_S(t)$ 单位为伏特(V) 输出信号取自电容，试求网络的响应。

解：输入信号 $u_S(t)$ 含有 3 个正弦分量，令其分别为

$$u_{S1}(t) = 10\sin\Omega t$$

$$u_{S2}(t) = 6\sin 2\Omega t$$

$$u_{S3}(t) = 4\sin 3\Omega t$$

它们各自的响应分别用 $u_{C1}(t)$ 、 $u_{C2}(t)$ 和 $u_{C3}(t)$ 表示，总响应为

$$u_C(t) = u_{C1}(t) + u_{C2}(t) + u_{C3}(t)$$

角频率为 ω 的正弦电压 $U_S \sin(\omega t + \phi)$ 的矢量表示式为 $U_S(\omega) = U_S e^{j\phi}$ ，当它作用于图 1-6 的电路时，电容上的电压矢量为：

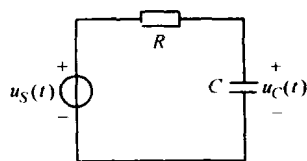


图 1-6

$$\begin{aligned} U_C(\omega) &= \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \times U_S(\omega) = \frac{U_S(\omega)}{1 + j\omega RC} \\ &= \frac{U_S(\omega)}{1 + j0.5\omega} \end{aligned} \quad (1-5)$$

将 $u_{S1}(t)$ 、 $u_{S2}(t)$ 和 $u_{S3}(t)$ 的矢量表示式分别带入式 (1-5) 中。

$u_{S1}(t)$ 的矢量表示式为 $U_{S1}(\omega) = 10$ ，其角频率 $\omega = \Omega = 1 \text{ rad/s}$ ，则

$$U_{C1}(\Omega) = \frac{1}{1 + j0.5} 10 = 8.94 e^{-j26.57^\circ} \text{ V}$$

其瞬时表示式为

$$u_{C1}(t) = 8.94 \sin(\Omega t - 26.57^\circ) \text{ V}$$

同理可求得

$$u_{C2}(t) = 4.24 \sin(2\Omega t - 45^\circ) \text{ V}$$

$$u_{C3}(t) = 2.22 \sin(3\Omega t - 56.3^\circ) \text{ V}$$

电容器上的总电压即网络的总响应为

$$u_C(t) = [8.94 \sin(\Omega t - 26.57^\circ) + 4.24 \sin(2\Omega t - 45^\circ) + 2.22 \sin(3\Omega t - 56.3^\circ)] \text{ V}$$

图 1-7 给出了图 1-6 所示网络的输入信号波形图和输出信号波形图。

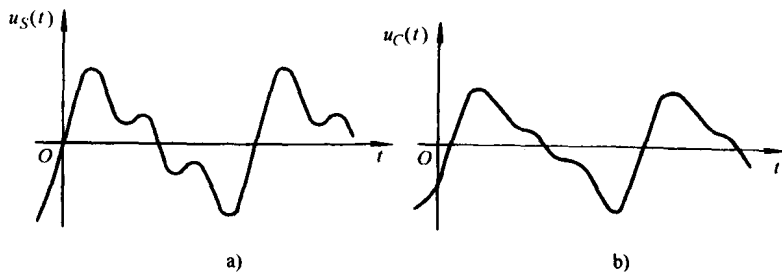


图 1-7 例 1-2 中输入/输出信号波形

a) 输入信号波形 b) 输出信号波形

由上例可见，在计算各正弦激励的响应时，式 (1-5) 起着十分重要的作用。我们令输出相量与输入相量之比为 $H(j\omega)$ ，即

$$H(j\omega) = \frac{\text{输出相量}}{\text{输入相量}}$$

$H(j\omega)$ 称为网络的传输函数（或网络函数），也称为网络的频率响应（或频率特性）。通常它是频率的复函数，可写成

$$H(j\omega) = H(\omega)e^{j\phi(\omega)}$$

上式中， $H(\omega)$ 是 $H(j\omega)$ 的模，是输出正弦信号与输入正弦信号幅度之比，称为网络的幅频特性； $\phi(\omega)$ 是 $H(j\omega)$ 的相位，是输出正弦信号与输入正弦信号相位差，称为网络的相频特性，一般情况下它们是频率的函数。

例 1-2 的网络

$$H(j\omega) = \frac{U_c(\omega)}{U_s(\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} e^{-j\arctg\omega RC}$$

其模和相位分别为

$$\begin{cases} H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \\ \phi(\omega) = -\arctg\omega RC \end{cases}$$

图 1-8 给出了相应的幅频曲线和相频曲线。

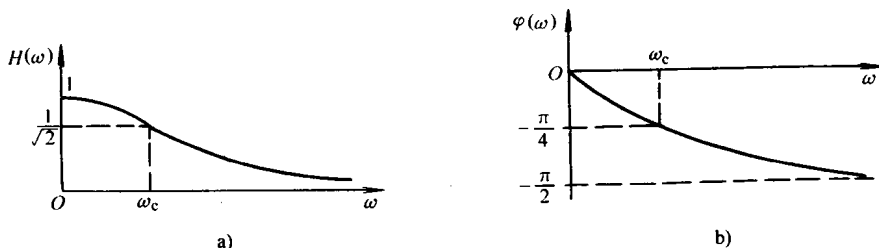


图 1-8 例 1-2 网络的频率响应

a) 幅频曲线 b) 相频曲线

由图 1-8 可见，当频率较低时， $H(\omega) \approx 1$ ；当频率很高时， $H(\omega) \approx 0$ 。这表明，图 1-6 所示的网络可通过低频信号而抑制高频信号。也由此可知，网络的传输函数反映了网络在非单一频率信号作用下的工作特性。

1.2.3 信号的不失真传输条件

由于网络的幅频特性和相频特性往往是频率的函数，因而网络对输入信号中不同频率分量的幅度及相位的影响程度不同，这使得输入信号经过网络后会产生波形失真。对比图 1-7 中的输入与输出波形，可知信号 $u_s(t)$ 经过图 1-6 的网络后产生了波形失真。

信号波形的失真直接影响着信号传输的质量，应尽量避免或尽可能地减小它。为此人们提出这样的问题：要使信号经过网络后不产生波形失真，网络应该具有怎样的频率响应呢？这就是信号无失真传输条件的问题。

所谓信号无失真的传输是指信号经过网络后其输出信号与输入信号相比，只有幅度的大小和出现时间先后的不同，而波形没有变化。如图 1-9a 所示是输入信号，它经过线性网络后的输出信号 $y(t)$ 如图 1-9b 所示。由图可见，输出信号 $y(t)$ 比输入信号 $f(t)$ 的幅度小，并延迟了一段时间 t_d ，而波形是完全相同的。