

WUTP

普通高等学校
自动化类专业新编系列教材

Signal Processing Technology

信号处理技术

主 编 徐科军
副主编 全书海 王建华



武汉理工大学出版社

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

Signal Processing Technology

信号处理技术

主 编 徐科军
副主编 全书海 王建华
主 审 庄镇泉

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书介绍信号处理技术的基本原理、方法和应用。全书共分为八章,内容包括:信号的基本概念;数据采集与模拟信号的数字化;离散系统与 z 变换;离散傅里叶变换和快速傅里叶变换;功率谱分析及应用;频率响应函数分析及应用;波形分析,相关分析及应用;数字滤波器设计;数字信号处理的硬件实现;小波分析。大部分章节附有习题和思考题。本书可作为工科电类专业本科生的教材和教学参考书,也可供有关教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号处理技术/徐科军主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2001,11

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

ISBN 7-5629-1760-4

I. 信…

II. 徐…

III. 信号处理-高等学校-教材

IV. TN911.7

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路122号 邮编:430070

HTTP://www.whut.edu.cn/chuban1

E-mail:wutp @ public.wh.hb.cn

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉理工大学出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.50

字 数:383.8千字

版 次:2001年11月第1版

印 次:2001年11月第1次印刷

印 数:5000册

定 价:21.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换

本社购书热线电话:(027)87397097 87394412

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

出版说明

世纪之交,我国高等学校的人才培养工作正处在一个关键的历史时期。为了适应我国改革开放和社会主义现代化建设特别是社会主义市场经济体制对高等教育人才培养工作的新要求,为了适应世界科学技术发展的新趋势和新特点,原国家教育委员会组织对普通高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订,并于1998年7月由教育部正式颁布实施。修订后的专业目录中,自动化类专业的专业面大大拓宽,相应的专业培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。要适应新的专业培养目标和教学要求,组织一套新的自动化类专业系列教材就成了当务之急。为此,武汉理工大学出版社在广泛调研的基础上,组织国内近30所大学的近100位教授共同编写了这套系列教材。

本套教材定位于普通高等学校自动化类专业本科层次,遵照教育部颁发的《普通高等学校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求,依据2000年5月全国23所高等院校的70多位专家教授在武汉共同确定的指导思想和编写大纲进行编写,具有如下特点:

观念新——主动适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求;

内容新——自动化技术在近20年来进展巨大,并与计算机技术、航空航天技术、建筑工程、生物工程、社会科学(社会系统与经济系统)联系越来越紧密,这套教材尽可能反映了这些内容,以适应21世纪自动化与控制工程人才的培养要求;

体系新——在以前的基础上重构和重组,而非重建。各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化,避免遗漏和不必要的重复;

与国际接轨——自动化类专业教育要面向世界,面向未来,面向区域经济。在借鉴发达国家高等教育的专业模式和课程设置的同时,适当兼顾当前各地区经济文化发展不平衡的现状;

教学手段现代化——本套教材力求具有网络化、电子化、数字化的特色,大力推进电子讲稿和多媒体课件的出版工作。

本系列教材是在21世纪初推出的目前系统优化、品种较全、作者阵容最强的一套普通高等学校自动化类(本科)系列教材。我们将高度重视,兢兢业业,保证质量,恳请选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提意见和建议,以便我们不断修订、补充、完善全套教材。

21世纪已经到来,知识经济的曙光已经初现。面向新世纪的中国高等教育正在经历前所未有的变革和发展,人文与理工相通,科学与技术相融,教学与研究并重,知识与智慧同尊,以培养社会经济文化发展所需要的复合型人才,这是我国建立知识创新体系的重大挑战和空前机遇。我社愿与各位专家、读者真诚合作,共同努力,为新世纪的中国高等教育事业做出更大的贡献。

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

编审委员会

顾问：

郑大钟 熊有伦 戴冠中 萧德云 陈伯时 周祖德
项国波 席裕庚 褚 健

主任委员：

萧蕴诗 张崇巍 陈大钦 吴 坚 陈福祥 高鸣涵

委员(按姓氏笔画顺序)：

马建国	王 辉	王孝武	王明阳	王建华	王俊杰
文 方	方康玲	卢京潮	龙 伟	申功璋	叶春生
全书海	吕 锋	刘 泉	刘涤尘	刘京南	李汉强
李磊民	宋靖雁	林 都	林 辉	林锦国	杨 波
杨天怡	杨家本	周泽义	胡 超	赵英凯	赵曾贻
侯朝桢	钟 珞	须文波	翁维勤	夏承铨	郭圣权
徐科军	黄席樾	章卫国	彭容修	程耕国	温阳东
曾庆军	谢克明	熊前兴	黎明森	戴文进	

编委会秘书：

黄 春

总责任编辑：

杨学忠 徐秋林

前 言

当今是信息时代,在科研、生产和工程建设中,信号处理技术,特别是数字信号处理技术应用日益广泛,正发挥着越来越重要的作用。所以,作为一名电子信息与电气学科专业的大学生,必须掌握信号处理的基本原理和方法,了解它的应用。为此,我们根据教育部大学本科专业引导性目录,针对目前专业大调整,宽口径培养人才,课程学时数减少的情况,为电气工程与自动化专业(即原来的工业自动化专业,电机、电器及控制专业和电力系统及自动化专业)的信号处理技术课程编写了这本教材。考虑到总学时数的减少,拟在40~60学时内讲授完这门课程,使学生通过本课程的学习,掌握信号处理的基本原理和基本方法,了解信号处理技术的各种应用。为了内容的相对完整,为了方便更多的学校选用,本教材编写的章节较多,教师可以选讲部分章节。如果学生已学过数据采集和 z 变换,第1、2章可以不讲。另外,第7章和第8章也可以选学。

第1章介绍数据采集与模拟信号的数字化。在电气工程和自动化领域,大多数信号是模拟量,所以,先要对数据进行采集和数字化,才能进行数字信号处理。本章介绍采样过程、采样定理和采样方式;由于采样频率不满足采样定理的要求,产生频率混叠现象,可以通过提高采样频率或设置抗混叠滤波器的方法加以解决;量化和量化误差;各种编码;孔径时间;数据采集系统的组成、各部分的功能,以及典型的数据采集系统。

第2章介绍离散系统与 z 变换。序列即为离散时间信号。本章介绍序列的表示、常用序列和序列运算;序列的 z 变换; z 变换的基本性质; z 反变换;离散系统的数学模型与分析;差分方程的描述,离散卷积的描述,离散状态方程描述;物理可实现系统;因果系统,稳定系统,可实现系统。

第3章介绍离散傅里叶变换和快速傅里叶变换。傅里叶变换概述:傅里叶级数、傅里叶变换以及傅里叶变换的定理;离散傅里叶变换;离散傅里叶变换的性质;离散傅里叶反变换;快速傅里叶变换;FFT的基本思想,按时间抽取(DIT)基2 FFT算法,按频率抽取(DIF)基2 FFT算法,实数序列的FFT,FFT的逆变换(IFFT)。

第4章介绍频域分析及其应用。叙述功率谱分析的有关内容:功率的概念、功率与频谱之间的关系、功率谱的两种估计方法以及功率谱估计的几个应用例子。简要介绍互谱分析。给出倒频谱分析的基本概念和两个应用。阐述谱分析中的几个重要问题:预处理、频谱泄漏与窗函数之间的关系、谱分析的基本步骤以及频谱校正方法。介绍频率响应函数分析的有关内容:频率响应函数的基本特性、相干函数、频率响应函数的测定和频率响应函数的几个应用例子。

第5章介绍时域分析及其应用。简要介绍波形分析的有关内容:周期波形参数及其求法、复杂周期波形的谐波分析和随机波形分析。重点介绍相关分析的基本原理、方法和应用;相关系数的概念;自相关函数的定义、性质、估计方法和应用;互相关函数的定义、性质、估计方法和应用。

第6章介绍数字滤波器设计。对滤波器进行概述;简介典型模拟滤波器设计;重点介绍

无限冲激响应(IIR)数字滤波器设计方法:冲激响应不变法和双线性变换法,以及有限冲激响应(FIR)数字滤波器设计方法:窗函数法。

第7章介绍数字信号处理的硬件实现。简要介绍数字信号处理器(DSP)的特点、类型及应用。着重介绍 ADSP21XX 定点 DSP:功能结构、指令系统、开发工具以及编程举例。

第8章介绍小波分析。短时傅里叶变换及其时频分析,连续小波变换及其性质,离散小波变换。

本书由合肥工业大学博士生导师徐科军研究员任主编,武汉理工大学全书海教授和华东船舶工业学院王建华教授任副主编。绪论、第1章、第4章、第5章和第7章由合肥工业大学徐科军编写,第6章和第8章由武汉理工大学全书海编写,第2章由华东船舶工业学院王建华和张冰编写,第3章由华东船舶工业学院王建华和周昌雄编写。本教材由中国科学技术大学博士生导师庄镇泉教授主审,在审稿中提出了许多指导性意见。在起草编写大纲过程中,得到合肥工业大学博士生导师邓善熙教授的指导。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中可能存在不妥之处,欢迎读者批评指正。

2001年5月

目 录

0 绪论	(1)
0.1 信号及其描述	(1)
0.1.1 确定性信号	(1)
0.1.2 随机信号	(4)
0.2 信号处理的基本内容	(5)
0.3 信号处理的发展与应用	(7)
1 数据采集与模拟信号数字化	(8)
1.1 采样技术	(9)
1.1.1 采样过程	(9)
1.1.2 采样定理	(9)
1.1.3 频率混叠	(11)
1.1.4 采样方式	(13)
1.2 量化	(13)
1.2.1 定义	(13)
1.2.2 量化方法	(14)
1.2.3 量化误差	(14)
1.3 编码	(16)
1.4 孔径时间	(19)
1.5 数据采集系统	(20)
1.5.1 数据采集系统的结构形式	(20)
1.5.2 数据采集系统的软件	(24)
1.5.3 典型数据采集系统	(25)
本章小结	(26)
习题和思考题	(26)
2 离散系统与 z 变换	(27)
2.1 序列的表示与运算	(27)
2.1.1 离散时间信号	(27)
2.1.2 几种常用序列	(27)
2.1.3 序列的运算	(30)
2.2 z 变换及其性质	(31)
2.2.1 序列的 z 变换	(31)
2.2.2 z 变换的基本性质	(35)
2.2.3 z 反变换	(38)
2.3 离散系统的数学模型与分析	(42)

2.3.1	离散系统的数学模型	(42)
2.3.2	差分方程的描述	(43)
2.3.3	离散卷积的描述	(44)
2.3.4	离散状态方程描述	(45)
2.4	物理可实现系统	(50)
2.4.1	因果系统	(50)
2.4.2	稳定系统	(50)
2.4.3	物理可实现系统	(51)
本章小结		(52)
习题和思考题		(52)
3	离散傅里叶变换和快速傅里叶变换	(54)
3.1	傅里叶变换概述	(54)
3.1.1	离散时间序列傅里叶变换	(54)
3.1.2	离散时间序列傅里叶变换性质	(58)
3.2	离散傅里叶变换	(61)
3.2.1	周期序列的离散傅里叶级数	(61)
3.2.2	离散傅里叶变换	(65)
3.3	离散傅里叶变换性质	(71)
3.3.1	线性与对称性	(71)
3.3.2	序列的循环移位与循环卷积	(74)
3.3.3	用循环卷积计算序列的线性卷积	(78)
3.3.4	DFT 在实际应用中的问题	(84)
3.4	快速傅里叶变换	(86)
3.4.1	概述	(86)
3.4.2	时间抽取(DIT)基 2 FFT 算法	(87)
3.4.3	频域抽取(DIF)基 2 FFT 算法	(95)
3.4.4	快速傅里叶逆变换	(97)
3.4.5	线性调频 z 变换算法	(99)
本章小结		(101)
习题和思考题		(102)
4	频域分析	(105)
4.1	概述	(105)
4.2	功率谱分析及应用	(105)
4.2.1	功率的概念	(106)
4.2.2	巴什瓦定理	(106)
4.2.3	功率谱的计算	(107)
4.2.4	功率谱应用	(110)
4.2.5	互谱分析	(112)
4.3	倒频谱分析及应用	(113)

4.3.1	语言信号的分析	(113)
4.3.2	对齿轮和轴承等动态分析和故障诊断	(114)
4.4	谱分析中的几个重要问题	(115)
4.4.1	预处理	(115)
4.4.2	频谱泄漏与窗函数	(116)
4.4.3	谱分析的基本步骤	(119)
4.4.4	频谱校正方法	(120)
4.5	频率响应函数分析及应用	(124)
4.5.1	频率响应函数的基本特性	(124)
4.5.2	相干函数	(125)
4.5.3	频率响应函数的测定	(127)
4.5.4	频率响应函数的应用	(128)
	本章小结	(132)
	习题和思考题	(132)
5	时域分析	(134)
5.1	波形分析	(134)
5.1.1	周期波形参数及其求法	(134)
5.1.2	复杂周期波形的谐波分析	(134)
5.1.3	随机波形分析	(135)
5.2	相关分析	(136)
5.2.1	相关系数	(136)
5.2.2	自相关函数	(137)
5.2.3	自相关函数应用	(140)
5.3	互相关函数	(141)
5.3.1	定义和性质	(141)
5.3.2	估计方法	(142)
5.3.3	互相关函数的应用	(143)
	本章小结	(146)
	习题和思考题	(146)
6	数字滤波器设计	(148)
6.1	滤波器概述	(148)
6.1.1	滤波概念与基本原理	(148)
6.1.2	滤波器的分类与技术要求	(149)
6.2	典型模拟滤波器设计简介	(151)
6.2.1	概述	(151)
6.2.2	巴特沃斯模拟低通滤波器设计	(152)
6.2.3	切比雪夫模拟低通滤波器设计	(154)
6.3	无限冲激响应(IIR)数字滤波器设计	(158)
6.3.1	用冲激响应不变法设计 IIR DF	(158)

6.3.2	用双线性变换法设计 IIR DF	(160)
6.3.3	IIR 数字滤波器的频率变换法	(165)
6.4	有限冲激响应(FIR)数字滤波器设计	(167)
6.4.1	概述	(167)
6.4.2	用窗函数法设计 FIR DF	(168)
	本章小结	(179)
	习题和思考题	(179)
7	数字信号处理的硬件实现	(182)
7.1	概述	(182)
7.1.1	DSP 的特点	(182)
7.1.2	DSP 的分类	(183)
7.1.3	DSP 的发展	(183)
7.1.4	DSP 的应用领域	(184)
7.2	ADSP21XX 定点 DSP	(184)
7.2.1	体系结构	(186)
7.2.2	指令系统	(193)
7.3	ADSP21XX 开发工具	(201)
7.3.1	概述	(201)
7.3.2	系统构造器	(202)
7.3.3	汇编器	(204)
7.3.4	连接器	(206)
7.3.5	模拟器	(207)
7.3.6	PROM 生成器	(207)
7.3.7	实验板	(208)
7.3.8	在线仿真器	(209)
7.4	ADSP21XX 编程举例	(212)
7.4.1	定点算术算法	(212)
7.4.2	解差分方程	(217)
7.4.3	滤波器实现	(219)
	本章小结	(222)
8	小波分析	(223)
8.1	短时傅里叶变换及其时频分析	(223)
8.2	连续小波变换及其性质	(226)
8.2.1	连续小波函数	(226)
8.2.2	连续小波变换	(228)
8.2.3	连续小波变换的一些性质	(228)
8.2.4	连续小波变换的逆变换	(229)
8.2.5	重建核方程	(230)
8.3	离散小波变换	(231)

8.3.1 尺度和时移参数的离散化	(231)
8.3.2 小波框架	(233)
本章小结.....	(234)
参考文献.....	(235)

0 绪 论

在科学和工程技术领域中常常需要对信号进行处理。随着计算机和信息科学的飞速发展,信号处理在工程技术领域应用越来越广泛,所起的作用越来越大。那么,什么是信号,如何描述它?信号处理的内容、方法及其特点是什么?信号处理有哪些方面的应用,以及它的发展趋势如何?这就是本章要介绍的内容。

0.1 信号及其描述

信号是信息的载体,是信息的物理表现形式,是信息的函数。信号可以分为确定性信号和非确定性信号两大类。能够精确地用明确的数学关系式来描述的信号称为确定性信号。不能精确地用明确的数学关系式来描述,无法预测任意时刻的精确值的信号称为随机信号,它只能用概率术语和统计平均来描述。

有许多物理现象产生的信号是可以相当精确地用明确的数学关系式来表示的。例如,振动台的正弦振动,电容器通过电阻放电时两端电压的变化,单摆受脉冲作用的振动响应,卫星在轨道上围绕地球的运动等,基本上都是确定性信号。但是,也有许多物理现象产生的信号是随机的。例如,汽车、火车运行时的振动,起伏海面的波高,噪声发生器输出的电信号等,都不能用明确的数学关系式来描述,无法预测任意时刻的精确值,所以这些信号在性质上是随机的。

某种信号究竟是确定性的还是随机的,在许多场合是很难确定的。例如,某些意外的因素影响了产生信号的物理现象,导致其偏离原有的规律,因此可以说,真正确定性的信号在实际中是没有的。但另一方面,如果对产生信号的物理现象的基本规律有足够的认识,就可以用精确的数学公式来描述它,因此又可以说,真正随机的信号也是不存在的。实际中,判断信号是确定性的还是随机的,通常以实验能否重复产生这些信号为依据。如果一个实验,能够重复多次得到相同的结果(在实验误差范围之内),则一般可以认为这些数据是确定性的。如果不能设计一种实验,使重复实验产生相同的结果,则一般认为这些数据是随机的。

0.1.1 确定性信号

确定性信号可以分为周期的和非周期的两类。周期信号又可分为简谐周期信号和复杂周期信号两类。非周期信号可分为准周期信号和瞬变信号。

(1) 简谐周期信号

简谐周期信号可以表示为

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (0.1.1)$$

或

$$x(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (0.1.2)$$

式中 A ——振幅;

f_0 ——频率,赫兹(Hz);

φ ——相对于时间原点的初始相角,弧度;

$x(t)$ ——时间上的瞬时值。

式(0.1.1)或式(0.1.2)可以画成波形图和振幅频率图(频谱),如图0.1.1所示。

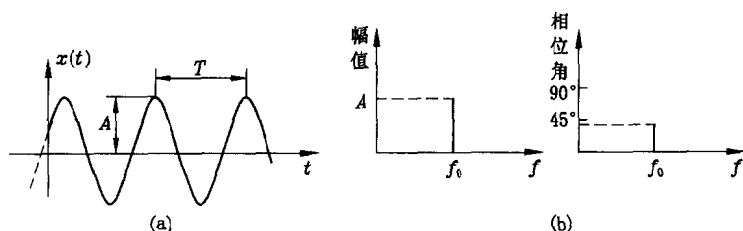


图 0.1.1 正弦信号的波形和频谱

(a) 波形图; (b) 频谱图

在实际中,有很多物理过程会产生近似的简谐信号。例如,交流发电机的电压输出,不平衡旋转重物的振动运动等。

(2) 复杂周期信号

复杂周期信号能用周期性的时变函数表示

$$x(t) = x(t \pm nT), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (0.1.3)$$

式中 T ——周期。

这种时变函数在一般区间上具有基频频率的整数倍数的波形。显然,正弦波是复杂周期波的一个特例。

复杂周期信号可以按傅里叶级数公式展开成下列级数

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_1 t + b_n \sin 2\pi n f_1 t) \quad (0.1.4)$$

式中 $f_1 = \frac{1}{T}$;

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos 2\pi n f_1 t dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots;$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin 2\pi n f_1 t dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots。$$

复杂周期信号还可以用傅里叶级数的另一种形式表达,即

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cos(2\pi n f_1 t - \varphi_n) \quad (0.1.5)$$

式中 $X_0 = \frac{a_0}{2}$;

$$X_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots;$$

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots。$$

式(0.1.5)表明复杂周期信号是由一个静态分量 X_0 和无限个谐波余弦分量(振幅为 X_n , 相位为 φ_n)组成,各谐波分量的频率都是 f_1 的整数倍。只考虑它的幅值谱时,式(0.1.5)可以用图0.1.2所示的离散谱线来表征。

实际中产生复杂周期信号的状况远多于产生简谐信号的状况。事实上,归类为简谐的信号往往是复杂信号的一种近似表示。例如,交流发电机的输出电压,经观测,它具有一定的高频分量。多缸往复式发动机的振动响应,通常会有明显的谐波分量。

(3) 准周期信号

如前所述,周期信号一般可以简化成一系列频率成比例的正弦波。反过来,两个或几个频率成比例的正弦波叠加起来,将组成一个周期信号。但是,任意频率的两个或几个正弦波之和,一般不会组成周期信号。具体地讲,只有每一对频率之比都是有理数时,两个或几个正弦波之和才是周期性的。例如, $x(t) = X_1 \sin(3t + \varphi_1) + X_2 \sin(5t + \varphi_2) + X_3 \sin(8t + \varphi_3)$ 是周期性的,因为 $3/5$ 、 $3/8$ 、 $5/8$ 是有理数(基本周期 $T=1$)。而函数 $x(t) = X_1 \sin(3t + \varphi_1) + X_2 \sin(5t + \varphi_2) + X_3 \sin(\sqrt{72}t + \varphi_3)$ 不是周期性的,因为 $3/\sqrt{72}$ 和 $5/\sqrt{72}$ 不是有理数(基本周期无限长)。这个函数对应的时间历程将具有“准周期”的特性。

准周期信号可表示为

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (0.1.6)$$

式中,至少有两个频率 f_n 、 f_m 之比 f_n/f_m 不是有理数。

实际中,当两个或几个无关联的周期现象混合作用时,常常会产生准周期性的信号。多机组内燃机车和螺旋推进飞机在发动机不同步时的振动响应就是一个很好的准周期信号的例子。

准周期的一个重要性质是:若把相角 φ_n 忽略,则式(0.1.6)可用离散谱来表征,如图 0.1.3 所示。这与处理复杂周期性信号一样,其差别只是在于各分量的频率不再是有理数的关系。

(4) 瞬变非周期信号

除了准周期以外的非周期信号都属于瞬变信号。图 0.1.4 给出了瞬变信号的三个简单例子。图 0.1.4(a) 的波形可以表示电容器放电时的变化情况。图 0.1.4(b) 的波形可以表示激振力消除后振动系统的阻尼自由振动。图 0.1.4(c) 的波形可以代表承载钢索在 $t=t_1$ 断裂时端点中的应力。

瞬变信号与周期和准周期信号不同的一个重要特征,就是不能用离散谱表示。但是,在大多数情况下,瞬变信号可以用傅里叶积分表示成连续谱。

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (0.1.7)$$

傅里叶谱 $X(f)$ 一般是个复数,它可以用复数极坐标符号表示成

$$X(f) = |X(f)| e^{-j\theta(f)} \quad (0.1.8)$$

式中, $|X(f)|$ 是 $X(f)$ 的模, $\theta(f)$ 是相角。

图 0.1.5 给出了图 0.1.4 中三个瞬变时间历程的傅里叶幅值谱,它们由 $|X(f)|$ 表示。

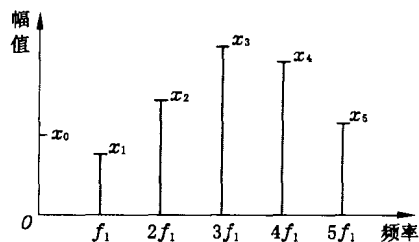


图 0.1.2 复杂周期信号的频谱

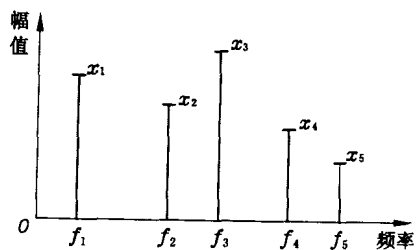


图 0.1.3 准周期信号的频谱

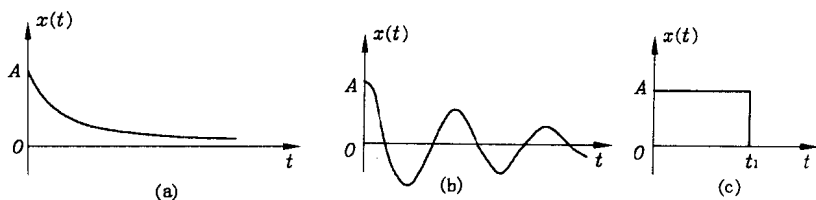


图 0.1.4 瞬变信号示例

$$(a) x(t) = \begin{cases} Ae^{-at}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}; \quad (b) x(t) = \begin{cases} Ae^{-at}\cos bt, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}; \quad (c) x(t) = \begin{cases} A, & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & t < 0 \text{ or } t > t_1 \end{cases}$$

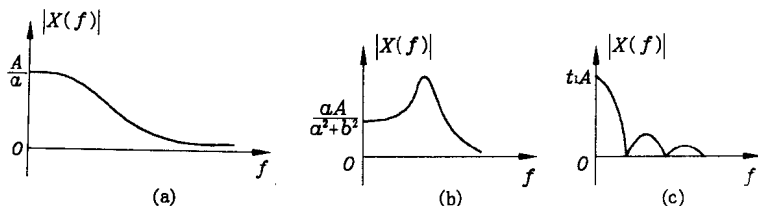


图 0.1.5 瞬变信号的谱

0.1.2 随机信号

随机物理现象的信号不能用精确的数学关系式来描述,因为这种现象的每一次观测都是不一样的,即任意一次观测只代表许多可能产生的结果之一,这种数据就是随机信号。表示随机现象的单个时间历程,称为样本函数,在有限时间区间上观测时,称为样本记录。随机现象可能产生的全部样本函数的集合,称为随机过程。

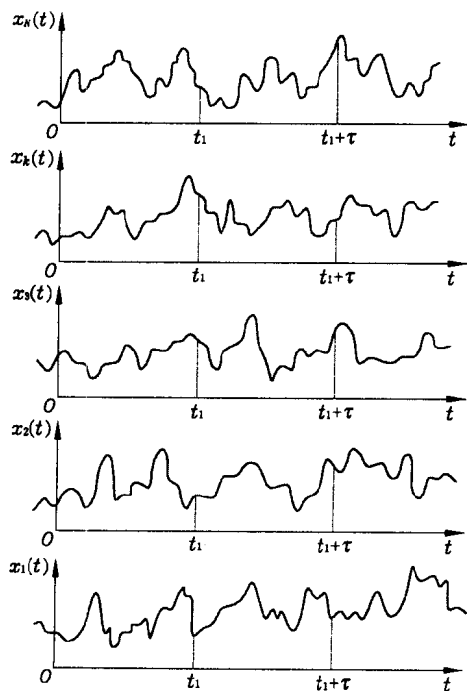


图 0.1.6 组成随机过程的样本函数总体

随机过程可分为平稳和非平稳过程两类。

平稳随机过程可进一步分为各态历经和非各态历经两类。非平稳随机过程可进一步分为一般非平稳随机过程和瞬变随机过程。

(1) 平稳随机过程

若把某个物理现象看作是一个随机过程,这个现象在任何时刻的特性就可以用随机过程样本函数集合的平均值来描述。例如,如图 0.1.6 所示的一随机过程的样本函数集合(也称总体),则随机过程在某一时刻 t_1 上的均值,就是将 t_1 上总体中各样本函数的瞬时值相加,然后除以样本函数的个数,这就是以后经常用到的总体平均概念。类似地,随机过程两不同时刻之值的相关性也称为自相关函数,可以用 t_1 和 $t_1 + \tau$ 两时刻瞬时值乘积的总体平均得到。

我们一般用符号 $\{ \}$ 表示样本函数的总体。于是随机过程 $\{x(t)\}$ 的均值 $m_x(t_1)$ 和自相关函数 $R_x(t_1, t_1 + \tau)$ 分别为

$$m_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \quad (0.1.9)$$

$$R_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \quad (0.1.10)$$

其中最后求和时,假定各样本函数都有等可能性。

在一般情况下, $m_x(t_1)$ 和 $R_x(t_1, t_1 + \tau)$ 都随 t_1 改变而变化,此时随机过程 $\{x(t)\}$ 为非平稳的。在特殊情况下,若 $m_x(t_1)$ 和 $R_x(t_1, t_1 + \tau)$ 不随 t_1 改变而变化,则称随机过程 $\{x(t)\}$ 为弱平稳的或广义平稳的。对于弱平稳过程,均值是常数,自相关函数仅与时间位移 τ 有关,即

$$m_x(t_1) = m_x \quad (0.1.11)$$

$$R_x(t_1, t_1 + \tau) = R_x(\tau) \quad (0.1.12)$$

(2) 各态历经随机过程

在大多数情况下,可以用总体中某样本函数的时间平均来确定平稳随机过程的特性。如图 0.1.6 所示,随机过程中对于第 k 个样本函数,它的均值 $m_x(k)$ 和 $R_x(\tau, k)$ 分别为

$$m_x(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \quad (0.1.13)$$

$$R_x(\tau, k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) x_k(t + \tau) dt \quad (0.1.14)$$

如果随机过程 $\{x(t)\}$ 是平稳的,而且用不同样本函数计算式(0.1.13)和式(0.1.14)中 $m_x(k)$ 和 $R_x(\tau, k)$ 的结果都一样,则称此随机过程为各态历经的。对于各态历经的随机过程,按时间平均的均值和自相关函数,以及所有其他按时间平均的量等于相应的随机过程总体平均值,即 $m_x(k) = m_x, R_x(\tau, k) = R_x(\tau)$ 。

各态历经随机过程的所有特性可以用单个样本函数上的时间平均来描述,因此,各态历经随机过程显然是随机过程中很重要的一类。实际上,表示平稳物理现象的随机信号,一般是近似各态历经的。在大多数情况下,可以用单个观测到的时间历程记录来测定平稳随机现象的总体特征。

(3) 非平稳随机过程

非平稳随机过程包括所有不满足平稳性要求的随机过程。非平稳随机过程的特性一般是随时间而变化的,只能用组成过程的样本函数的总体瞬时平均来确定。在实际中,由于不容易得到足够数量的样本记录来精确地测量总体平均性质,因此对非平稳随机过程的测试和分析是比较困难的。

0.2 信号处理的基本内容

所谓信号处理就是对信号进行分析、变换、综合、识别等加工处理,以达到提取信息和便于利用的目的。信号可分为模拟信号和数字信号。模拟信号在时间上和幅度上是连续的;数字信号在时间上和幅度上是离散的,且可以用有限字长表示。对模拟信号进行处理,既可以使用模拟系统,也可以使用数字系统。在使用数字系统处理时,需要先将模拟信号数字化,使之成为数字信号,然后用数字系统处理,得到一个处理后的数字信号,再经过数模转换得到所需要的模拟信号。对数字信号进行处理是将数字化的序列输入到数字系统,例如计算机,经过预定算法的程序处理,得到数字输出信号。本教材主要介绍数字信号处理技术。