



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业研究生系列教材

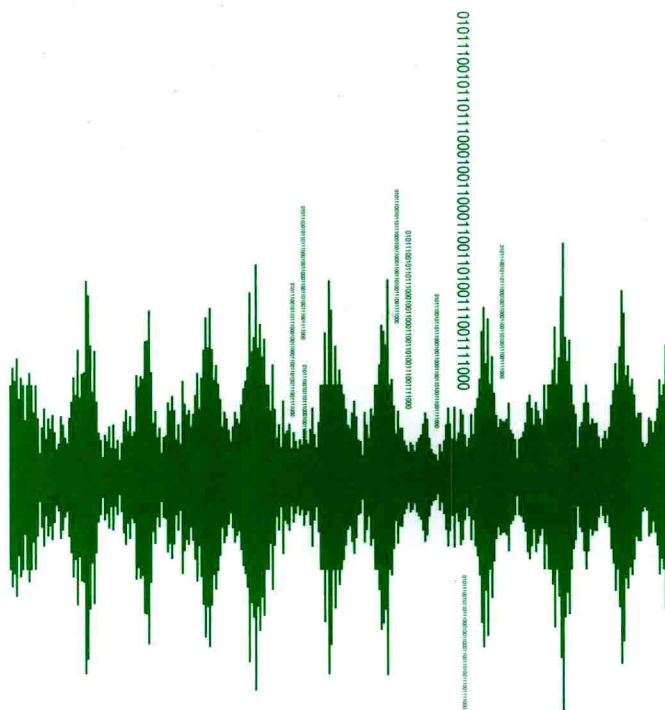
Signal Processing and Data Analysis

信号处理与数据分析

邱天爽 郭莹 编著

Qiu Tianshuang

Guo Ying



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指
高等学校电子信息类专业研究生系列教

Signal Processing and Data Analysis

信号处理与数据分析

邱天爽 郭莹 编著
Qiu Tianshuang Guo Ying

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书面向非电子信息类各工程技术领域硕士研究生和高年级本科生,系统介绍信号处理与数据分析的基础理论与基本应用,旨在使读者基本掌握信号处理与数据分析的基本理论与基本方法,能够结合各专业领域的具体问题,利用信号处理与数据分析的技术手段,解决科学研究或工程实际中与信号处理相关的技术问题。

全书共分14章,包括:信号与系统的基本概念与原理、傅里叶理论与信号系统的频域分析、拉普拉斯变换与 z 变换及信号系统的复频域分析、连续信号的离散化与离散信号的连续化、离散傅里叶变换与快速傅里叶变换、数字滤波器与数字滤波器设计、数字信号处理中的有限字长效应、数据的误差分析与信号的预处理、随机信号分析基础、随机信号的相关函数与功率谱密度函数估计、随机信号的统计最优滤波技术、自适应滤波技术、高阶与分数低阶统计量信号处理、现代信号处理简介。

本书适合用作高等院校非电子信息类专业信号处理类课程的教材或教学参考书,也可供有关教师 and 工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

信号处理与数据分析/邱天爽,郭莹编著.--北京:清华大学出版社,2015

高等学校电子信息类专业研究生系列教材

ISBN 978-7-302-39566-9

I. ①信… II. ①邱… ②郭… III. ①数字信号处理—研究生—教材 ②数据处理—研究生—教材
IV. ①TN911.72 ②TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 046565 号

责任编辑:梁 颖

封面设计:李召霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:29.5

字 数:718 千字

版 次:2015 年 6 月第 1 版

印 次:2015 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.00 元

前言

FOREWORD

随着信息技术的飞速发展及其在各领域的逐步应用,以信息提取为目标的信号处理与数据分析技术越来越成为信息技术的重要研究领域,同时日益向机械、土木、化工、材料、冶金、能源、动力、生物医学等非信息类工程领域渗透,得到越来越广泛的重视和应用,成为这些领域技术进步的一个重要推动力。反过来,这些领域所提出的应用问题,也为信号处理与数据分析的研究提出了新的课题。

本书面向非电子信息类硕士研究生和高年级本科生,系统介绍信号处理与数据分析的基础理论与基本应用,旨在使读者掌握信号处理与数据分析的基本理论与基本方法,能够结合各专业领域的具体问题,利用信号处理与数据分析的技术手段,解决科学研究或工程实际中与信号处理相关的技术问题。

本书有以下特点:

(1) 由浅入深、循序渐进。本书针对非信息类学生缺乏电子信息基础理论的问题,特别补充了与“信号与系统”课程相关的内容。

(2) 内容广泛、体系完备。本书内容取材广泛,基本上覆盖了信号与系统、数字信号处理、数据处理与误差分析、统计信号处理和现代信号处理五个方面的基本内容,并形成自身较为完备的体系。

(3) 联系实际、注重应用。本书在系统介绍基本理论的基础上,给出了较多的例题和实际应用介绍,并结合 MATLAB 编程,给出了较多的算法介绍与实现,便于非信息类读者学习掌握。

为了编写本教材,编者进行了广泛的文献资料调研,参考借鉴了国内外出版的较多优秀著作、文献和教材,适合用作高等院校非电子信息类各工程技术专业硕士生和高年级本科生信号处理类课程的教材或教学参考书,也可用作在职工程硕士研究生有关信号处理类课程的教材或教学参考书。此外,还可供有关教师和工程技术人员参考。

全书共分 14 章,主要内容有:信号与系统的基本概念与原理、傅里叶理论与信号系统的频域分析、拉普拉斯变换与 z 变换及信号系统的复频域分析、连续信号的离散化与离散信号的连续化、离散傅里叶变换与快速傅里叶变换、数字滤波器与数字滤波器设计、数字信号处理中的有限字长效应、数据的误差分析与信号的预处理、随机信号分析基础、随机信号的相关函数与功率谱密度函数估计、随机信号的统计最优滤波技术、自适应滤波技术、高阶与分数低阶统计量信号处理、现代信号处理简介。

本书由邱天爽(第 1~12 章)和郭莹(第 13 和 14 章)编写完成,由邱天爽统稿。

感谢大连理工大学电子信息与电气工程学部领导给予的关怀和支持,感谢大连理工大学研究生教改基金提供的资助和支持。此外,还要特别感谢大连理工大学博士和硕士研究生栾声扬、张颖、戴睿娇、史益新、朱永杰、陈朝峰和刘涛等同学提供的计算机仿真、资料搜集和书稿校对等帮助。由于时间仓促,加之编者水平所限,难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 1 月于大连理工大学

目录

CONTENTS

第 1 章 信号与系统的基本概念与原理	1
1.1 引言	1
1.2 信号与系统的基本概念	1
1.2.1 信号的基本概念	1
1.2.2 信号的分类	2
1.2.3 典型信号及其特性	4
1.2.4 信号的运算	10
1.2.5 系统的基本概念	12
1.2.6 系统的分类与特性	13
1.2.7 系统的基本分析方法	15
1.3 线性时不变系统时域分析与卷积	16
1.3.1 线性时不变系统的基本概念	16
1.3.2 连续时间 LTI 系统的时域分析	17
1.3.3 连续时间 LTI 系统的卷积运算	17
1.3.4 离散时间 LTI 系统的时域分析	19
1.3.5 离散时间 LTI 系统的卷积运算	20
1.4 线性时不变系统的基本性质	22
1.4.1 LTI 系统的记忆性	22
1.4.2 LTI 系统的可逆性	22
1.4.3 LTI 系统的因果性	22
1.4.4 LTI 系统的稳定性	23
习题	23
第 2 章 傅里叶理论与信号系统的频域分析	25
2.1 引言	25
2.1.1 信号与系统的频域分析与傅里叶理论概要	25
2.1.2 傅里叶理论的发展概况	25
2.1.3 傅里叶级数与傅里叶变换的分类	26
2.2 连续时间周期信号的傅里叶级数	27
2.2.1 连续时间周期信号及其傅里叶级数	27
2.2.2 连续时间傅里叶级数的性质	29
2.2.3 傅里叶级数的其他形式	31

2.3 离散时间周期信号的傅里叶级数	32
2.3.1 离散时间周期信号及其傅里叶级数	32
2.3.2 离散傅里叶级数的性质	34
2.4 连续时间信号的傅里叶变换	35
2.4.1 从傅里叶级数到傅里叶变换	35
2.4.2 连续时间信号的傅里叶变换	36
2.4.3 连续时间傅里叶变换的性质和常用变换对	39
2.5 离散时间信号的傅里叶变换	42
2.5.1 离散时间傅里叶变换	42
2.5.2 离散时间傅里叶变换的性质和常用变换对	44
2.5.3 傅里叶理论中的对偶性	45
2.6 信号与系统的频域分析	47
2.6.1 信号的频谱表示	47
2.6.2 LTI 系统的频率特性分析	50
2.6.3 波特图	53
2.6.4 系统无失真传输条件与系统物理可实现条件	55
习题	55
第3章 拉普拉斯变换与 z 变换及信号系统的复频域分析	60
3.1 引言	60
3.2 拉普拉斯变换	61
3.2.1 拉普拉斯变换的定义	61
3.2.2 拉普拉斯变换收敛域的性质	62
3.2.3 拉普拉斯逆变换	63
3.2.4 拉普拉斯变换的性质和常用变换对	66
3.3 连续时间信号与系统的复频域分析	67
3.3.1 微分方程的拉普拉斯变换与系统函数	67
3.3.2 LTI 系统因果性和稳定性分析	68
3.3.3 单边拉普拉斯变换及其应用	70
3.4 z 变换	72
3.4.1 z 变换的定义	72
3.4.2 z 变换收敛域的性质	74
3.4.3 z 逆变换	74
3.4.4 z 变换的性质和常用变换对	77
3.5 离散时间信号与系统的复频域分析	79
3.5.1 差分方程的 z 变换与系统函数	79
3.5.2 LTI 系统的因果性与稳定性分析	80
3.5.3 离散时间系统的方框图表示	81
3.5.4 单边 z 变换及其应用	83
习题	84
第4章 连续信号的离散化与离散信号的连续化	88
4.1 引言	88

4.2	连续时间信号的采样与采样定理	89
4.2.1	基于单位冲激序列的理想采样与采样定理	89
4.2.2	连续时间信号的零阶保持采样	93
4.3	离散时间信号的插值与拟合	94
4.3.1	离散时间信号的插值	94
4.3.2	离散时间信号的拟合	97
4.3.3	插值与拟合的误差分析	98
	习题	100
第5章	离散傅里叶变换与快速傅里叶变换	102
5.1	引言	102
5.2	离散傅里叶变换	103
5.2.1	已有傅里叶变换的简要回顾	103
5.2.2	由离散傅里叶级数到离散傅里叶变换	104
5.2.3	离散傅里叶变换的性质	107
5.3	DFT 理论与应用中若干问题	111
5.3.1	频率混叠问题	111
5.3.2	频谱泄漏问题	112
5.3.3	栅栏效应	113
5.3.4	频率分辨率及 DFT 参数选择问题	114
5.3.5	信号补零问题	117
5.3.6	信号的时宽与频宽问题	117
5.4	二维傅里叶变换简介	119
5.4.1	常用的二维离散序列	119
5.4.2	二维傅里叶变换的定义	120
5.4.3	二维离散时间傅里叶变换的主要性质	120
5.4.4	二维离散傅里叶变换	121
5.4.5	二维离散傅里叶变换的应用举例	121
5.5	快速傅里叶变换	123
5.5.1	快速傅里叶变换的出现	123
5.5.2	DFT 直接计算的问题及可能的改进途径	124
5.5.3	按时间抽取基 2 FFT 算法	125
5.5.4	按频率抽取基 2 FFT 算法	130
5.5.5	线性调频 z 变换	133
5.6	FFT 的主要应用	137
5.6.1	线性卷积的 FFT 算法	137
5.6.2	线性相关的 FFT 算法	139
	习题	140
第6章	数字滤波器与数字滤波器设计	142
6.1	引言	142
6.1.1	数字滤波器的分类	142
6.1.2	数字滤波器的设计	144

6.2	数字滤波器结构的表示方法	144
6.2.1	差分方程表示法	144
6.2.2	系统函数表示法	145
6.2.3	系统方框图与信号流图表示法	145
6.3	无限冲激响应数字滤波器	146
6.3.1	直接 I 型结构	146
6.3.2	直接 II 型结构	146
6.3.3	级联结构	147
6.3.4	并联结构	148
6.4	有限冲激响应数字滤波器	149
6.4.1	横截型结构	150
6.4.2	级联结构	150
6.4.3	频率采样型结构	151
6.4.4	快速卷积结构	154
6.4.5	线性相位 FIR 滤波器结构与最小相位系统	155
6.5	数字滤波器的格型结构	157
6.5.1	全零点 FIR 系统的格型结构	157
6.5.2	全极点 IIR 系统的格型结构	160
6.5.3	零极点 IIR 系统的格型结构	160
6.6	IIR 数字滤波器的设计	161
6.6.1	滤波器的技术要求与模拟滤波器的设计概要	161
6.6.2	依据模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	163
6.6.3	冲激响应不变法设计数字滤波器	164
6.6.4	双线性变换法设计数字滤波器	167
6.6.5	数字高通、带通及带阻滤波器的设计思路	169
6.6.6	IIR 数字滤波器设计 MATLAB 程序实现	169
6.7	FIR 数字滤波器的设计	171
6.7.1	FIR 数字滤波器设计的窗函数法	171
6.7.2	窗函数的概念及主要窗函数介绍	174
6.7.3	FIR 数字滤波器设计的频率抽样法	176
6.7.4	几种常用的简单数字滤波器	179
习题		182
第 7 章	数字信号处理中的有限字长效应	185
7.1	引言	185
7.2	A/D 转换的量化效应	185
7.2.1	A/D 转换的基本概念与原理	185
7.2.2	A/D 转换的量化效应与误差分析	186
7.3	数字滤波器系数的量化效应	187
7.3.1	IIR 数字滤波器系数的量化效应	187
7.3.2	FIR 数字滤波器系数的量化效应	189
7.4	数字滤波器运算中有限字长效应	190

7.4.1 IIR 数字滤波器中的极限环振荡现象	190
7.4.2 IIR 数字滤波器中数据乘法运算的有限字长效应	191
7.4.3 FIR 数字滤波器中数据乘法运算的有限字长效应	192
7.5 离散傅里叶变换的有限字长效应	192
习题	193
第 8 章 数据的误差分析与信号的预处理	195
8.1 引言	195
8.2 误差的基本概念与理论	195
8.2.1 误差的基本概念	195
8.2.2 随机误差	196
8.2.3 系统误差	197
8.2.4 粗大误差	198
8.2.5 误差的合成	199
8.2.6 误差的分配	200
8.3 测量不确定度的评定与估计	200
8.3.1 测量不确定度的基本概念	201
8.3.2 标准不确定度的评定	201
8.3.3 测量不确定度的合成	202
8.4 数据处理的最小二乘方法	202
8.4.1 最小二乘法基本原理	203
8.4.2 正规方程: 最小二乘处理的基本方法	205
8.4.3 最小二乘处理的精度估计	208
8.4.4 组合测量的最小二乘法处理	209
8.5 回归分析	211
8.5.1 一元线性回归分析	211
8.5.2 一元非线性回归分析	214
8.5.3 多元线性回归分析	215
8.6 信号中趋势项和野点的去除	217
8.6.1 信号趋势项的去除	217
8.6.2 信号中野点的识别与处理	219
8.7 温度测量与数据处理应用实例	221
8.7.1 温度与温度测量	221
8.7.2 铂电阻温度测量方法工程实例	222
8.7.3 温度测量的数据分析处理	222
习题	223
第 9 章 随机信号分析基础	225
9.1 引言	225
9.2 随机变量的概念与特性	225
9.2.1 随机变量的概念	225
9.2.2 随机变量的分布	226
9.2.3 随机变量的数字特征	228

9.2.4	随机变量的特征函数	230
9.3	随机过程与随机信号	231
9.3.1	随机过程与随机信号及其统计分布	231
9.3.2	平稳随机信号	233
9.3.3	各态历经性	234
9.3.4	随机信号功率谱的概念	234
9.3.5	非平稳随机信号	235
9.4	常见的随机信号与随机噪声	236
9.4.1	高斯(正态)分布随机信号	236
9.4.2	白噪声与带限白噪声过程	237
9.4.3	高斯-马尔可夫过程	237
9.4.4	其他常见随机噪声	238
9.4.5	随机信号与噪声的产生方法	238
9.5	随机信号通过线性系统	240
9.5.1	线性系统输出及概率分布	240
9.5.2	线性系统输出的数字特征	240
9.5.3	系统的等效噪声带宽与随机信号的带宽	242
9.6	随机信号的经典分析方法	243
9.6.1	常见随机信号的概率密度函数	244
9.6.2	随机信号数字特征的计算	244
9.7	随机信号的现代参数模型方法	246
9.7.1	随机信号的沃尔德分解定理	246
9.7.2	平稳随机信号的线性参数模型	246
9.7.3	AR 模型参数的估计	247
9.7.4	AR 模型阶数的确定	250
习题		251
第 10 章	随机信号的相关函数估计与功率谱密度函数估计	254
10.1	引言	254
10.1.1	信号参数估计问题的基本任务	254
10.1.2	参数估计的评价准则	255
10.2	相关函数与功率谱密度函数	256
10.2.1	相关函数	256
10.2.2	功率谱密度函数	258
10.3	自相关序列的估计	258
10.3.1	自相关序列的无偏估计	258
10.3.2	自相关序列的有偏估计及其性质	260
10.3.3	自相关序列的快速估计方法	261
10.4	功率谱估计的经典方法	263
10.4.1	功率谱估计的发展概况	263
10.4.2	周期图谱估计方法	264
10.4.3	周期图谱估计的性能	266

10.4.4	改善周期图谱估计性能的方法	268
10.5	功率谱估计的现代方法	272
10.5.1	经典谱估计存在的问题	272
10.5.2	AR 模型谱估计方法	272
10.5.3	最大熵谱估计方法	275
10.5.4	MA 模型与 ARMA 模型谱估计方法	277
10.5.5	最小方差谱估计方法	279
10.5.6	皮萨伦科谱分解方法	280
10.5.7	基于矩阵特征分解的谱估计方法	281
10.5.8	各类现代谱估计方法的比较	284
10.6	信号的倒谱分析	285
10.6.1	倒谱的概念	285
10.6.2	同态滤波与倒谱分析的应用	286
10.7	谱估计方法在信号分析中的应用	289
10.7.1	谱分析在工程技术中的应用举例	289
10.7.2	谱分析在医学诊断中的应用举例	291
习题		292
第 11 章	随机信号的统计最优滤波技术	296
11.1	引言	296
11.1.1	经典滤波器与统计最优滤波器	296
11.1.2	两种主要的统计最优滤波器	297
11.2	维纳滤波器的基本原理与方法	298
11.2.1	因果维纳滤波器	298
11.2.2	维纳-霍夫方程的求解	299
11.3	维纳预测器	305
11.3.1	因果维纳预测器	305
11.3.2	N 步纯预测器	307
11.3.3	一步线性维纳预测器	307
11.4	卡尔曼滤波器简介	308
11.4.1	卡尔曼滤波器的基本原理	308
11.4.2	卡尔曼滤波器的分析	311
11.4.3	卡尔曼滤波器的计算	312
习题		314
第 12 章	自适应滤波技术	316
12.1	引言	316
12.2	横向自适应滤波器结构与随机梯度法	316
12.2.1	横向自适应滤波器的结构及其性能函数	317
12.2.2	二次型性能表面的搜索	318
12.3	自适应滤波器的最小均方算法	322
12.3.1	LMS 算法	322
12.3.2	LMS 算法的性能分析	323

12.3.3	LMS 自适应滤波器的改进形式	330
12.3.4	应用中需要注意的问题	334
12.4	自适应滤波器的递归最小二乘算法	338
12.4.1	线性最小二乘原理	338
12.4.2	递归最小二乘自适应滤波器	339
12.4.3	应用中需要注意的问题	341
12.5	自适应滤波器的主要应用结构	341
12.5.1	自适应噪声抵消及其应用	341
12.5.2	自适应谱线增强及其应用	345
12.5.3	自适应系统辨识及其应用	348
习题		348
第 13 章	高阶与分数低阶统计量信号处理	351
13.1	高阶累积量	351
13.1.1	高阶统计量概述	351
13.1.2	特征函数	352
13.1.3	高阶矩和高阶累积量的定义	352
13.1.4	高阶累积量的性质	355
13.1.5	高斯过程的高阶累积量	356
13.1.6	高阶累积量的估计	357
13.2	高阶谱与高阶谱估计	359
13.2.1	高阶谱的定义	359
13.2.2	高阶谱的性质	359
13.2.3	线性非高斯过程的高阶谱	360
13.2.4	高阶谱的估计	361
13.3	分数低阶 α 稳定分布过程与分数低阶统计量	368
13.3.1	概述	368
13.3.2	α 稳定分布	370
13.3.3	分数低阶矩和共变系数	372
13.3.4	$S_{\alpha}S$ 分布的特征参数估计	374
13.3.5	方差收敛检测	375
13.3.6	样本的产生	376
13.4	分数低阶统计量信号处理的应用	377
13.4.1	分数低阶统计量在时间延迟估计中的应用	377
13.4.2	分数低阶统计量在子空间跟踪中的应用	383
习题		388
第 14 章	现代信号处理简介	391
14.1	时频分析方法	391
14.1.1	时频分析的基本概念	391
14.1.2	短时傅里叶分析	394
14.1.3	Gabor 展开	399
14.1.4	Cohen 类时频分布	407

14.1.5	时频分布在心电信号处理中的应用	413
14.2	小波分析基础	416
14.2.1	概述	416
14.2.2	连续小波变换	417
14.2.3	离散小波变换	420
14.2.4	多尺度(分辨)分析	423
14.2.5	小波变换的实现技术	430
14.2.6	常见的小波基函数	434
14.2.7	小波分析在信号消噪中的应用	435
14.3	希尔伯特-黄变换	439
14.3.1	概述	439
14.3.2	希尔伯特-黄变换的基本概念和理论	439
14.3.3	固有模态函数	445
14.3.4	希尔伯特谱和边界谱	448
14.3.5	应用举例	450
习题		453
参考文献		455

信号与系统的 基本概念与原理

1.1 引言

现代电子信息技术博大精深、包罗万象。除了其自身理论体系严谨完备之外,其应用范围也非常广泛。从上天入海的飞船、卫星和船舶舰艇,到面向微观世界的粒子物理和纳米技术;从基础工业的土木、化工、冶金、机械行业,到面向人体健康的医学检测诊断与治疗技术,到处都可以看到电子信息技术的身影。就更不用说目前已经深入人心的网络和通信技术了。尽管电子信息技术精彩纷呈,其应用领域几乎无所不在,但是其基础内容可以归结为信号与系统(signals and systems)的概念。可以这样说,信号与系统是现代电子信息技术的基石,现代电子信息的任何理论与应用及其发展,都与信号和系统这两个最基本的概念有关。

本章系统介绍信号与系统的基本概念。通过对连续时间信号与系统和离散时间信号与系统的详细研究,我们会看到,信号与系统构成了一个完整的分析体系,其中包括了描述信号与系统的语言和强有力的分析方法,而这种描述和分析是相互密切关联的。

1.2 信号与系统的基本概念

1.2.1 信号的基本概念

一般来说,信号(signal)是信息(information)的载体,而信息则是信号的具体内容。

人类在长期的生产和生活中,发明创造了诸多信息表示、交换与传输的方式。其中,语言交流是最基本、最广泛使用的信息交换与传输方式;当人们说话时,口腔声带发出的声波经过大气的传播到达他人的耳朵,引起鼓膜的振动,使他人通过语音信号了解到说话人的意图,即了解到对方要传递的信息。在中国历史上,采用点燃烽火台而产生狼烟的方式表示和传递敌军入侵的信息,并流传下来周幽王为博褒姒一笑而烽火戏诸侯的千古笑谈,实际上,利用烽火台来传递信息是一种光信号传递的方式。再者,各种无线电波和通信与计算机网络中的各种信号,都可以用于表示和传输相关的信息,这些信号属于电信号。

在电子信息科学技术领域,最常见的信号形式是电信号形式,即随时间、空间或其他独立变量变化的电压或电流,也可以是电荷、磁通量或电磁波等。其他形式的信号往往先通过传感器转换成电信号,然后再进行各种分析与处理。

信号的表示方式有多种,最常用的方式包括数学函数描述方式和曲线表示方式。一个信号可以用一个随时间、空间或其他独立变量变化的数学函数描述,例如,用正弦函数表示一个随时间按照正弦规律变化的信号:

$$x(t) = A\sin(\Omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

式中, t 为时间变量; A 表示信号的幅度; Ω 表示信号的频率; φ 表示信号的初始相位; $x(t)$ 则表示随时间 t 按照正弦规律变化的信号。这个信号也可以用曲线表示,以时间 t 为自变量,以 $x(t)$ 为函数,可以逐点描绘 $x(t)$ 的函数曲线,称为信号波形(waveform)。图1.1给出了 $x(t) = A\sin(\Omega t + \varphi)$ 的信号波形。

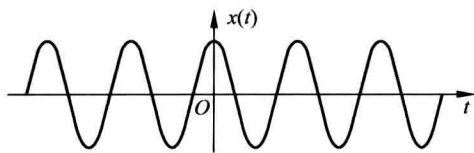


图 1.1 正弦信号的波形图

从数学的角度来看,图1.1给出的并不是正弦函数的曲线,而是余弦函数的曲线。但是实际上,在电子信息技术领域,通常并不严格区分正弦信号与余弦信号,而往往笼统地将这类信号称为正弦类信号(sinusoidal signal)。

图1.1所示的信号曲线,可以认为是初始相位 $\varphi = \pi/2 = 90^\circ$ 的正弦信号。

此外,信号还有许多其他表示方式,例如信号的频谱(spectrum)表示方式、信号的时频(time-frequency)表示方式,以及信号的空间(space)表示方式等。这些表示方式将在本书的后面章节进行介绍。

与信号的概念密切相关的是信号处理(signal processing)与信号分析(signal analysis)的概念。所谓信号处理,是指对信号进行某种加工和变换,主要包括削弱信号中多余的内容,滤除混杂的噪声和干扰,将信号变换成易于分析与识别的形式,估计信号的有关参量等。所谓信号分析,是指研究信号的基本性能,主要包括信号的描述、分解、变换、检测、特征提取以及信号的设计等。

1.2.2 信号的分类

为了便于对信号进行描述、分析和应用,通常要对信号进行分类。信号的分类有多种不同的方法,主要包括以下几种。

1. 确定性信号与随机信号

若信号可以表示为某一确定时间变量的函数,则称这种信号为确定性信号。

若信号具有某种不可预知的不确定性,则这种信号称为不确定性信号或随机信号。

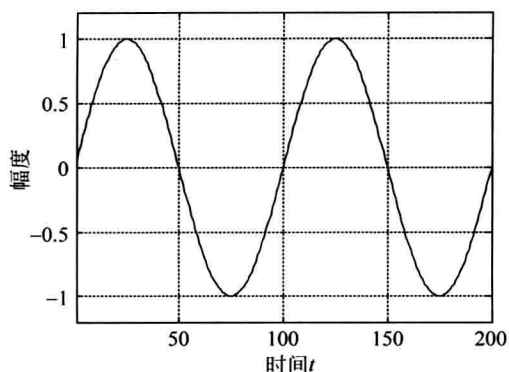
图1.2给出了确定性信号与随机信号的示意图。

2. 连续时间信号与离散时间信号

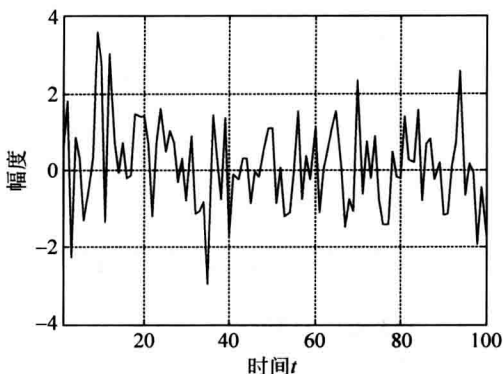
在给定的时间间隔内,除若干不连续点之外,对于任意时间值都可给出确定性的函数值,称这样的信号为连续时间信号(continuous-time signal),常记为 $x(t)$ 。

离散时间信号(discrete-time signal)定义在离散的时间点上,即其时间变量仅在一个离散集上取值,常记为 $x(n)$,有的书中也使用方括号,记为 $x[n]$ 。

图1.3给出了连续时间信号与离散时间信号的示意图。

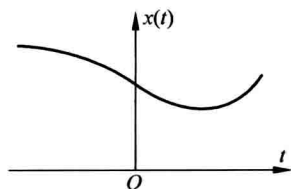


(a) 确定性信号

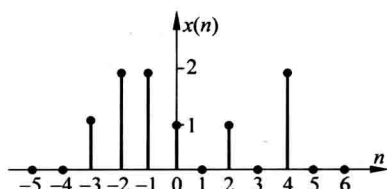


(b) 随机信号

图 1.2 确定性信号与随机信号举例



(a) 连续时间信号



(b) 离散时间信号

图 1.3 连续时间信号与离散时间信号示意图

3. 周期信号与非周期信号

若信号 $x(t)$ 满足

$$x(t) = x(t + mT), \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.2)$$

条件,则称 $x(t)$ 为周期信号(periodic signal)。其中, T 为信号的基本周期(fundamental period), $2T, 3T$ 等也是信号的周期(period)。

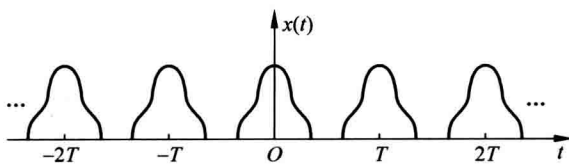
同样,对于离散时间信号,若 $x(n)$ 满足

$$x(n) = x(n + mN), \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.3)$$

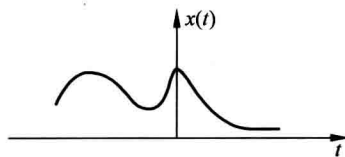
条件,则称 $x(n)$ 为周期信号。其中, N 为信号的基本周期, $2N, 3N$ 等也是信号的周期。

不满足式(1.2)和式(1.3)的信号为非周期信号(aperiodic signal)。此外,若周期信号的 $T \rightarrow \infty$ (或 $N \rightarrow \infty$),则周期信号变为非周期信号。

图 1.4 给出了周期和非周期信号的示意图。



(a) 周期信号



(b) 非周期信号

图 1.4 周期信号和非周期信号示意图

4. 能量信号与功率信号

能量为有限值的信号称为能量有限信号,简称为能量信号(energy signal)。功率为有限值的信号称为功率有限信号,简称为功率信号(power signal)。通常,有界的有限时宽信号为能量信号,而连续时间正弦信号是功率信号的典型例子。