

高等学校电气信息类基础课程规划教材

信号与信息处理基础

主 编 彭 军 李 宏
副主编 支国明 王 玮
主 审 施荣华



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校电气信息类基础课程规划教材

信号与信息处理基础

主 编 彭 军 李 宏
副主编 支国明 王 玮
主 审 施荣华

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书主要介绍信号与信息处理的基础理论和应用方法。全书共分为8章,内容包括信号与信息处理的基本知识、连续时间信号的时域分析、连续时间信号的频域分析、连续时间信号的复频域分析、离散时间信号的时域分析、离散时间信号的频域分析、离散时间信号的复频域分析和信息论与编码。为了满足学生研究性学习的需要,本书大部分章节增加了思考题和上机练习题。

本书适合作为电气信息类专业本科生教材,主要面向自动化、通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术、信息安全、测控和电气工程及自动化专业的学生,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与信息处理基础/彭军,李宏主编. —北京:中国铁道出版社,2009.1

(高等学校电气信息类基础课程规划教材)

ISBN 978-7-113-09573-4

I. 信… II. ①彭… ②李… III. ①信号分析—高等学校—教材 ②信息处理—高等学校—教材 IV. TN911.6 G202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 013639 号

书 名: 信号与信息处理基础

作 者: 彭 军 李 宏 主编

策划编辑: 严晓舟 杨 勇

编辑部电话: (010)83550579

责任编辑: 秦绪好

责任校对: 鲍 闻

封面设计: 付 巍

封面制作: 白 雪

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

印 刷: 中国铁道出版社印刷厂

版 次: 2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

开 本: 787mm×1 092mm 1/16 印张: 13.25 字数: 309 千

印 数: 5 000 册

书 号: ISBN 978-7-113-09573-4/TN·170

定 价: 24.00 元

版权所有 侵权必究

本书封面贴有中国铁道出版社激光防伪标签,无标签者不得销售

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社计算机图书批销部调换。

前 言

人才培养是高校的根本任务。寻求人才培养模式的突破,培养高素质创新型人才已经成为各国高等教育一项重要的战略任务。为了实现教育“面向现代化,面向世界,面向未来”的时代要求,坚持培养人才是根本、教学改革是核心的指导思想,信息学院在构建创新型人才培养模式方面进行了积极的探索 and 改革。

在 2008 年新实行的本科教学培养方案中,信息科学与工程学院开始不分专业按电气信息类招生。电气信息大类依据厚基础、宽口径、强素质、注重学科交叉的原则,培养在知识结构、能力结构和人文素质结构三方面兼顾的电子与电气信息领域的具有自主学习能力的复合型人才。

为了使能够较系统地掌握本学科的基础理论、知识和技能,我们以创新理念为指导,吸收国内外高等教育改革和发展的先进经验,希望通过“信号与信息处理基础”精品课程的建设,带动教学内容、教学方法和手段的改革,全面提高教学水平和人才培养质量。

电气信息大类实行宽口径培养,学生入学后第一年完成本大类开设的全校性通识教育课程和大类基础课程学习;第二年按控制类、计算机类和信息通信类三个子类完成学科大类基础课程学习;后两年根据人才需求情况和学生的学习成绩、志愿情况可选择到本大类的七个专业(自动化、通信工程、电子信息工程、计算机科学与技术、信息安全、测控和电气工程、自动化)完成专业课程学习。

“信号与信息处理基础”作为 2008 版中南大学本科教学培养方案中电气信息类专业新开设的学科大类基础课程,将在第一个学年的第二个学期即 2009 年春季首次为 2008 级电气信息类学生开设。

当今是信息时代,在科学研究、生产建设和工程实践中,信号处理技术,特别是数字信号处理技术的应用日益广泛,信息技术在当今社会的重要性日渐体现,作为一名电气信息类的大学生,必须掌握信号与信息处理的基本原理和方法,了解它的应用。

“信号与信息处理基础”课程已经从通信工程和电子信息工程类专业的专业基础课程扩展成信息学科电气信息类学生的新增学科基础课。其内容也根据新技术以及教学对象的变化不断进行调整,其应用背景也从单一的通信系统扩展到了其他的信息处理系统。该课程是“信号与系统”、“数字信号处理”、“信息论与编码”课程的综合与提炼。

本教材以信号与信息处理的基础理论和方法为中心,内容包括:信号的基本知识、连续时间信号的时域分析、连续时间信号的频域分析、连续时间信号的复频域分析、离散时间信号的时域分析、离散时间信号的频域分析、离散时间信号的复频域分析和信息论与编码。本教材重视理论联系实际,适当增加关于信号处理的典型应用实例,并介绍了基于 MATLAB 语言的信号处理方法的计算机实现。考虑到学生的自主学习和教材内容的完整性,教材在信号分析中简要介绍了拉普拉斯变换和 z 变换。为了满足学生研究性学习的需要,在有些章节增加了思考题和上机练习题。

第 1 章绪论主要介绍信号与信息处理所涉及的基本概念、基本内容和分析方法。

第 2 章从连续时间信号时域的角度,介绍时域普通信号和奇异信号的基本运算及特

殊运算。

第3章从连续时间信号频率的角度,利用傅里叶变换分析周期信号、非周期信号的频率特性,并介绍了相应的一些实际应用。

第4章主要介绍拉普拉斯变换及其性质,并利用拉普拉斯变换分析连续时间信号的复频域特性。

第5章主要介绍离散时间信号的基本概念、典型的离散序列以及序列的运算,并分析了离散时间信号的时域特性。

第6章研究了离散时间信号的频域分析,主要介绍序列的傅里叶变换以及离散傅里叶级数(DFS),并导出了离散傅里叶变换(DFT)。

第7章从离散时间信号复频域的角度,介绍离散时间序列的 z 变换及其性质,并利用 z 变换分析离散信号的复频域特性。

第8章介绍信息论与编码的基础知识,主要包括信息论、不确定性和信息、熵和平均互信息的概念,以及信息源编码定理、霍夫曼编码、信道编码定理和循环冗余校验码。

本教材的第1章由支国明、彭军编写,第2、3、4、7章由王伟编写,第5、6章由赵亚湘编写,第8章由梁建武编写。全书由彭军、李宏、支国明统稿,施荣华主审。

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。

编者
于中南大学
信息科学与工程学院
2008年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 信息、信号和信号分析与处理	1
1.1.2 信号分析与处理系统及其应用	2
1.1.3 本课程的体系结构	4
1.2 信号	6
1.2.1 信号的描述	6
1.2.2 信号的分类	6
1.2.3 信号的特性	9
1.3 离散时间基本信号	9
1.3.1 单位脉冲序列和单位阶跃序列	10
1.3.2 正弦序列	11
1.3.3 指数序列	12
1.4 连续时间基本信号	13
1.4.1 单位阶跃信号和单位冲激信号	13
1.4.2 正弦信号和指数信号	15
1.4.3 抽样函数	17
1.5 系统	17
1.5.1 连续时间系统及其描述	17
1.5.2 离散时间系统及其描述	18
1.5.3 系统特性	19
1.5.4 线性时不变系统	21
习题	21
第 2 章 连续时间信号的时域分析	22
2.1 信号间的基本运算	22
2.1.1 相乘	22
2.1.2 相加	27
2.2 普通信号的运算	29
2.2.1 平移	29
2.2.2 展缩	30
2.2.3 翻转	31
2.3 奇异信号的运算	34
2.3.1 抽样	34
2.3.2 平移	34
2.3.3 展缩	35

2.3.4	翻转	36
2.3.5	导数与积分	36
2.4	卷积积分	39
2.4.1	信号两种分解表示	40
2.4.2	卷积积分的定义	41
2.4.3	卷积积分的图解法	41
2.4.4	卷积积分积分限的确定	44
2.4.5	卷积积分的性质	45
2.5	相关运算	48
	习题	48
第3章	连续时间信号的频域分析	51
3.1	引言	51
3.2	周期信号的分解——傅里叶级数	52
3.2.1	三角形式	52
3.2.2	指数形式	55
3.3	周期信号的频谱分析	56
3.3.1	周期信号的频谱分析	56
3.3.2	周期信号的功率频谱	57
3.3.3	非正弦周期信号的有效值	59
3.4	非周期信号的分解——傅里叶变换	60
3.4.1	傅里叶级数到傅里叶变换	60
3.4.2	常用信号的傅里叶变换	61
3.4.3	奇异函数的傅里叶变换	62
3.5	傅里叶变换的性质	65
3.5.1	线性特性	65
3.5.2	奇偶特性	66
3.5.3	对称互易特性	67
3.5.4	时频展缩特性	67
3.5.5	时移特性	68
3.5.6	频移特性	68
3.5.7	时域卷积特性	71
3.5.8	乘积特性	72
3.5.9	时域微分和积分特性	73
3.5.10	频域微分和积分特性	75
3.5.11	非周期信号的能量谱	76
3.6	周期信号的傅里叶变换	77
3.7	信号的抽样与抽样定理、时分复用	78
	习题	84
第4章	连续时间信号的复频域分析	86
4.1	拉普拉斯变换及其性质	86
4.1.1	拉普拉斯变换	86
4.1.2	拉普拉斯变换的性质	88

4.2	常用信号的拉普拉斯变换	89
4.3	拉普拉斯反变换	90
	习题	93
第5章	离散时间信号的时域分析	95
5.1	离散时间信号的基本概念	95
5.2	常用的典型序列	97
5.3	序列的运算	102
	习题	112
第6章	离散傅里叶变换	115
6.1	序列傅里叶变换及其性质	115
6.1.1	序列傅里叶变换的定义	115
6.1.2	序列傅里叶变换的性质	116
6.2	周期序列的离散傅里叶级数	121
6.3	离散傅里叶变换 (DFT) 的定义	124
6.4	DFT 与 DTFT 的关系	126
6.5	离散傅里叶变换的基本性质	127
6.5.1	线性性质	127
6.5.2	循环移位性质	128
6.5.3	循环卷积定理	128
6.5.4	DFT 的共轭对称性	129
6.5.5	Parseval 定理	131
6.6	应用 DFT 计算线性卷积	132
6.7	应用 DFT 对信号进行频谱分析	133
6.7.1	利用 DFT 分析连续信号的频谱	133
6.7.2	利用 DFT 分析信号频谱时存在的几个问题	135
6.7.3	信号频谱分析举例	137
6.8	DFT 应用举例	141
	习题	151
第7章	离散时间信号的复频域分析	157
7.1	离散时间信号的 z 变换	157
7.2	常用信号的 z 变换	158
7.3	z 变换的性质	159
7.4	逆 z 变换	162
	习题	165
第8章	信息论与编码	166
8.1	信息论简介	166
8.1.1	信息	166
8.1.2	信息论的形成和发展	168
8.1.3	通信基本模型	169
8.2	不确定性和信息	170
8.3	熵和平均互信息	172

8.4	信源编码定理	177
8.5	霍夫曼编码	180
8.6	信道编码定理	183
8.6.1	信道的数学模型及其分类	183
8.6.2	信道容量	185
8.6.3	信道编码	185
8.7	循环冗余校验 (CRC) 码	187
8.7.1	线性分组码	187
8.7.2	循环码	189
8.7.3	循环冗余校验 (CRC) 码	191
	习题	192
附录 A	卷积积分的性质	194
附录 B	傅里叶变换的性质	195
附录 C	常用信号的傅立叶变换	196
附录 D	拉普拉斯变换的性质	197
附录 E	常用信号的拉普拉斯变换	198
附录 F	z 变换的性质	199
附录 G	常用信号的 z 变换	200
附录 H	Huffman 编码	201
参考文献		203

1.1 引 言

1.1.1 信息、信号和信号分析与处理

1. 信息

(1) 信息究竟是什么?

信息时代,人们可以从各种媒体获得许多信息,人们经常谈论信息、信息处理、信息系统和信息网等问题。控制论的创始人维纳认为,信息是人和物体与外部世界交换内容的名称。“内容”是事物的原形,而“交换”即信息载体将事物原形映射到人与其他物体的感觉器官,人们把这种映射的结果认为是获得了“信息”。通俗地说,“信息”指人们得到的“消息”,即原来不知道的知识。

实际上,不仅人类能接受信息,其他生物也能接受信息,非生物也都受到“信息”的作用,只是在不同领域中,通常不称其为信息,而称为刺激、激励或影响因素等。

(2) 信息的表现形式

信息是多种多样、丰富多彩的,它们的具体物理形态也千差万别。例如:语音信息(话音或音乐)是以声压变化表示的;视觉信息是以亮度或色彩表示的;文字和数据信息是以字符串表示的;影响物体运动的信息由作用于物体上的外力表示;影响经济运行的信息表现为投资及各个产业的统计数据等。

2. 信号

通常人们把信息的具体表现形式称为信号,或者说,信息是信号包含的内容。表现各种不同信息的信号都有一个共同点,即信号总是一个或多个独立变量的函数,它一般都包含了某个或某些现象性质的信息。信号不同的物理形态并不影响它们所包含的信息内容,且不同物理形态的信号之间可以相互转换。例如:以声压变化表示的语音信号可以转换成以电压或电流变化表示的语音电信号,甚至可以转换为一组数据表示的语音信号,即所谓数字语音。它们仅在物理形态上不一样,但都包含了同样的语音信息。

3. 信号分析与处理

为了充分地获取信息和有效利用信息,必须对信号进行分析与处理。其包括两个方面,即信号分析和信号处理。

信号分析就是通过解析方法或者测试方法找出不同信号的特征,从而了解其特性,掌握它随时间或频率变化的规律的过程。通过信号分析,可以将一个复杂的信号分解成若干个简单信号的

分量之和,或者用有限的一组参量去考察信号的特性。信号分析是获取信号源或信号传递系统特征信息的重要手段,人们往往通过对信号特征的深入分析,得到信号源或者系统特征、运行情况甚至故障等信息,这正是故障的诊断基础。

信号处理则指按某种需要或目的,对信号进行特定的加工、操作或修改。信号处理涉及的领域非常广泛,就其功能或目的而言,有诸如信号滤波、信号中的干扰/噪声抑制或滤除、信号平滑、信号锐化、信号增强、信号的数字化、信号的恢复和重建、信号的编码和译码、信号的调制和解调、信号加密和解密、信号均衡或校正、信号的特征提取、信号的辨识或目标识别、信息融合及信号的控制,等等。

现在信号分析与处理已不再是电子工程、自动化和计算机技术等工程领域的专利,而成为相当广泛的科学和工程领域中十分有用的概念和方法。

4. 信息论

信息论是一门应用概率论、随机过程、数理统计和近代代数的方法,来研究广义的信息传输、提取和处理系统中一般规律的工程学科。

信息论是信息科学和技术的基本理论以及信息科学大厦的地基,信息论又是高层次信息技术人才必不可少的基础知识。没有信息论的基础,从事通信与信息领域的研究和创新是一件不可能的事情。

数学家香农对信息论的主要五点贡献:第一次从理论上阐明了通信的基本问题,提出了通信系统的模型,如图 1-1 所示;提出了度量信息量的数学公式;初步解决了如何从信息接受端提取信息源发来的消息的技术问题;提出了如何充分利用信道的信息容量,如何在有限的信道中以最大的速率传递最大的信息量的基本途径;初步解决了如何编码/译码才能使信源的信息充分表达、信道的容量被充分利用的问题。

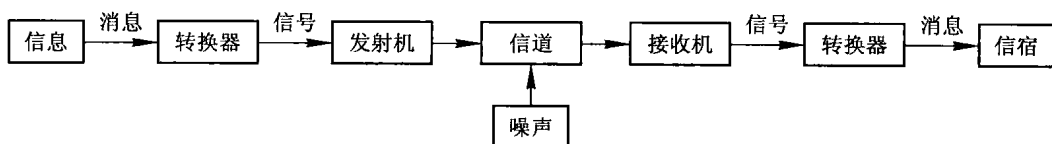


图 1-1 通信系统的组成

1.1.2 信号分析与处理系统及其应用

1. 信号分析与处理系统

语音信号系统主要是由信号输入设备、信号转换器、信源编码器、信道编码器、信号调制/解调器、信道解码器、信源解码器、信号转换器和信号输出设备组成,如图 1-2 所示。

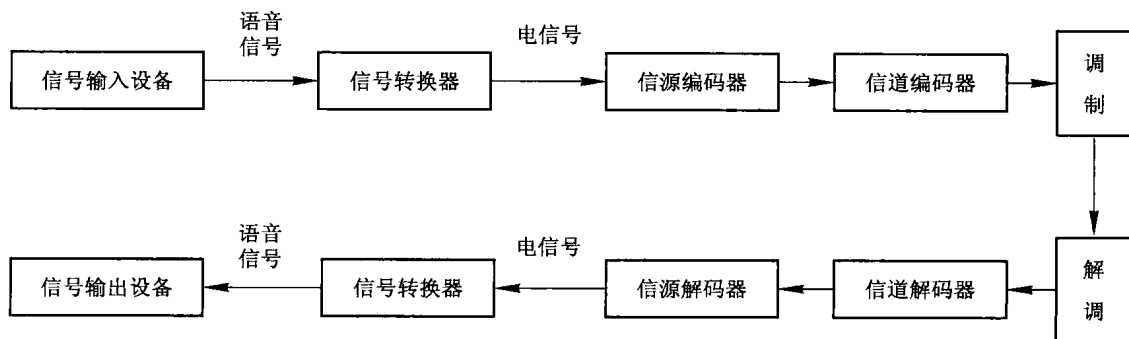


图 1-2 语音信号通信的一般模型

首先信源通过传感器(话筒)将语音信号变成电信号,然后进行信源和信道编码,再通过调制将调制后的信号通过信道(有线或者无线)传送到信宿端,信宿端将收到的信号进行解调,再进行信道解码和信源解码,得到电信号,最后通过音箱等设备将电信号转变成语音信号。

2. 信号分析与处理的发展和应用

近40年来,数字信号处理已逐渐发展成为一门非常活跃的、理论与实际紧密结合的应用基础科学,这主要归功于以下几个重要因素。

① 20世纪60年代中期以后高速数字计算机的发展已颇具规模,它可以处理较多的数据。

② 快速傅里叶变换(FFT)的提出,在大多数实际问题中能使离散傅里叶变换(DFT)的计算时间大大缩短;此外,若干高效的数字滤波算法的提出也促进了数字信号处理技术的发展。

③ 大规模集成电路的发展,使数字信号处理不仅可以在通用计算机上实现,而且可以用数字部件组成的专用硬件来实现。很多通用组件已经单片机化,甚至某些具有独立处理功能的系统也已经单片机化。这些都极大地降低了成本、减少了硬件体积并缩短了研制时间。

数字信号处理技术作为一门新兴学科,由于技术的先进性和应用的广泛性,越来越显示出强大的生命力,凡是需要对各种各样的信号进行谱分析、滤波、压缩等的科学领域和工程领域都要用到它,这种趋势还在发展。数字信号处理在语音处理、通信系统、声呐、雷达、地震信号处理、空间技术、自动控制系统、仪器仪表、生物医学工程和家用电器等方面得到了广泛应用。

数字信号处理的应用:

(1) 信号处理

如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、相关运算、谱分析、卷积、模式匹配、加窗、波形产生等。

(2) 通信

如调制解调器、自适应均衡、数据加密、数据压缩、回波抵消、多路复用、传真、扩频通信、纠错编码、可视电话等。

(3) 语音

如语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、说话人辨认、语音邮件、语音存储等。

(4) 图形/图像

如二维或三维图形处理、图像压缩与传输、图像增强、动画、机器人视觉等。

(5) 仪器仪表

如频谱分析、暂态分析、函数发生、锁相环、勘探、模拟试验等。

(6) 医疗电子

如助听器、CT扫描、超声波、心电图、核磁共振、医疗监护等。

(7) 军事与尖端科技

如雷达和声呐信号处理、导弹制导、火控系统、导航、全球定位系统、尖端武器试验、航空航天试验、宇宙飞船、侦察卫星等。

(8) 消费电子

如数字电视、高清晰度电视、数字电话、高保真音响、音乐合成等。

(9) 工业控制与自动化

如油井压力测量与控制、温度控制、开关电源控制等。

1.1.3 本课程的体系结构

本课程的体系结构如图 1-3 所示。

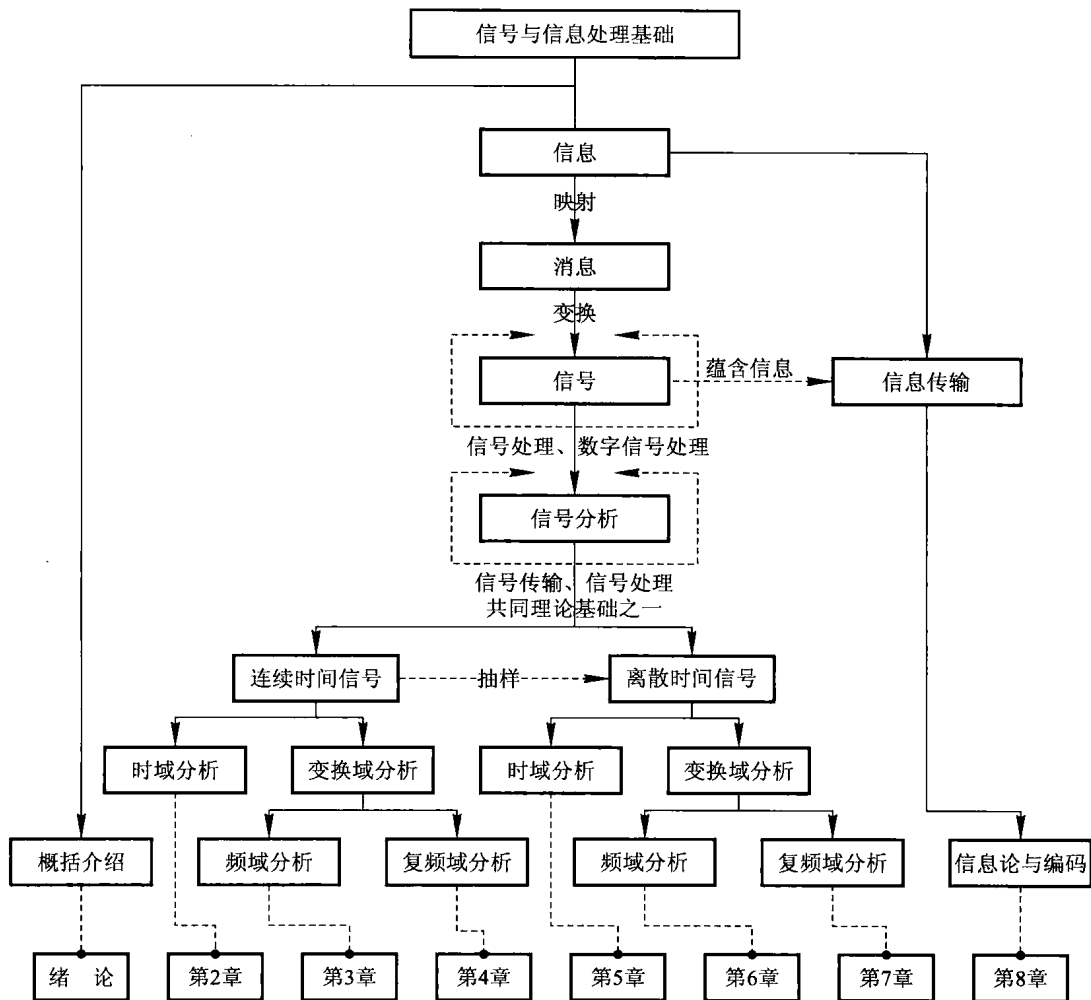


图 1-3 课程的体系结构

1. 连续时间信号和离散时间信号

尽管连续时间信号与系统和离散时间信号与系统有着不同的历史渊源,也各自经历了不同的发展过程,但是发展到今天,这两部分内容,从它们的数字描述,一直到它们的一系列概念、理论和方法,都存在着相当完美的对偶或类比关系。可以说,在连续时间信号与系统中的任何一个概念、理论和方法,几乎都能在离散时间信号与系统中找到其对偶或类比的概念、理论和方法。反之亦然。当然,它们之间的对偶和类比关系并不意味着两者完全相同,两者之间还是有差别或不同点的,有的地方甚至有重要的区别。

2. 时域方法和变换域方法

研究信号与系统问题的基本方法主要分两大类,一类称为时域方法,另一类叫做变换域方法。这里的方法既包括系统分析和信号分析方法,也包括系统综合和信号处理方法。时域方法主要是

卷积方法和方程(或方程组)的解法,而变换域方法主要包括频域方法和复频域方法,即傅里叶变换方法、拉普拉斯变换及其离散时间对偶—— z 变换方法。时域方法和变换域方法各有所长,互为补充,一起构成了完整的信号与系统的方法。本书将以先时域后变换域的方式,全面地介绍这两大类方法。

3. 信息论研究的主要问题

信息论要解答的最基本理论问题:

- ① 什么是信息? 如何度量?
- ② 在给定的信道中,信息传输有没有极限?
- ③ 信息能否被压缩和恢复? 极限条件是什么?
- ④ 从实际环境中(如有干扰、噪声)抽取信息,极限条件是什么?
- ⑤ 在允许一定失真(distortion)的条件下,信息能否被更大程度地压缩? 极限条件是什么?
- ⑥ 设计什么样的系统才能达到上述极限?
- ⑦ 现实中,接近极限的设备是否存在?

信息论不仅是信息科学的基础,而且与其他的学科联系密切,如图 1-4 所示。

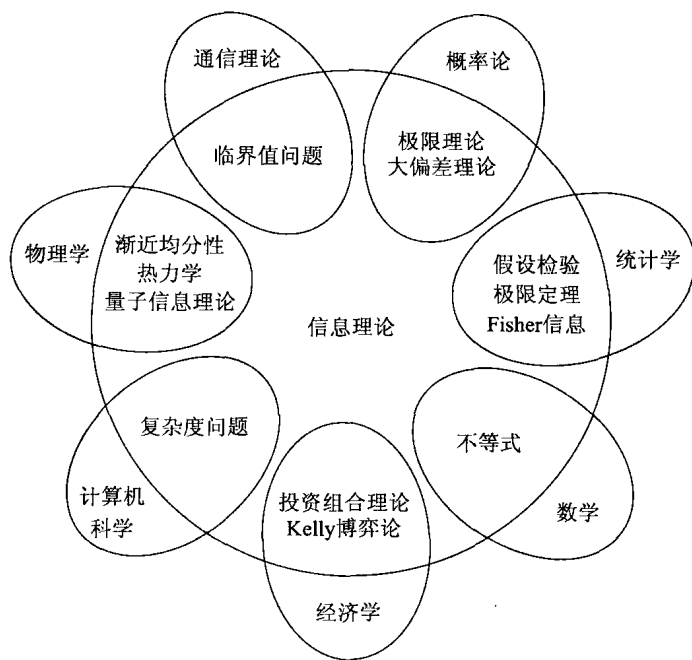


图 1-4 信息理论与其他的学科的关系

4. MATLAB 语言与信号处理

学习信号分析与处理技术,不仅要掌握其基本原理和方法,还要求用计算机语言编制相应的程序,实现其算法,得出正确的结果。这就少不了编程语言和环境,而 MATLAB 提供了用于科学计算的可视化、高性能的语言和软件环境,它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体,构成了一个界面友好的用户环境。在这个环境中,问题与求解都能方便地以数学语言(主要是矩阵形式)或图形方式表示出来。

MATLAB 的含意是矩阵实验室(matrix laboratory),该软件是一个交互式系统,其基本元素是无须定义维数的矩阵。它研制的初衷主要是方便矩阵的存取。但是经过几十年的扩充和完善,

它已成为各类科学研究与工程应用中的标准工具,数字信号处理就是其中一个典型的应用。

MATLAB 工具箱(toolbox)包括了各类应用问题的求解工具,其中信号处理工具箱包含各类经典的和现代的数字信号处理技术,是一个非常优秀的算法研究与辅助设计工具,它在语音信号处理、实时控制、仪器仪表和生物医学工程等多个研究领域都得到了成功的应用。

本书在各章中将给出相应的 MATLAB 函数和一些程序示例。

1.2 信 号

1.2.1 信号的描述

事物总是表现为时间和空间的存在及其运动过程。电信号的时空特征表现为信号的值(空间)随时间 t 的变化关系。从数学的观点出发,可以将信号描述为时间自变量 t 的函数,信号随时间 t 变化的曲线称为信号的波形。“函数”旨在强调变量间的数学描述和运算关系,而“信号”则突出其物理属性。为便于讨论,在本书中常常把信号与函数两个术语通用。除了表达式与波形这两种直观的描述方法之外,随着问题的深入,需要用频谱分析等其他方式来描述和研究信号。

从数学解析式来看,信号可以表示为一个或多个变量的函数。语音信号可表示为图 1-5 所示的幅度随时间 t 变化的函数 $x(t)$,其是一维信号。而图 1-6 所示的灰度图像每个点(像素)具有不同的亮度(灰度),任一点又是二维平面坐标中两个变量的函数 $I(x,y)$,这是二维信号。实际上,还可能出现更多维数变量的信号。例如电磁波在三维空间传播,同时考虑时间变量而构成四维信号。在以后的讨论中,一般情况下只研究一维信号,且自变量为时间。个别情况下,自变量可能不是时间。例如,在气象观测中,温度、气压或风速将随高度而变化,此时自变量可以为高度。

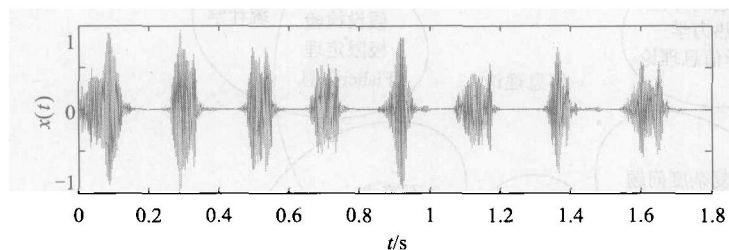


图 1-5 一段鸟鸣语音信号的波形



图 1-6 一幅灰度图像

1.2.2 信号的分类

为了分析和研究问题,可以按照不同角度对信号进行分类。例如,确定性信号和随机信号、周期信号和非周期信号、连续时间信号和离散时间信号、能量信号和功率信号等。

1. 确定性信号与随机信号

若信号被表示为确定的时间函数,对于指定的某一时刻,可确定一个相应的函数值,这种信号称为确定性信号(deterministic signal),也称为规则信号。例如,我们熟知的正弦信号。但实际传输的信号往往具有无可预知的不确定性,这种信号称为随机信号(random signals)或不确定的信号。如果通信系统中传输的信号都是确定的,接收者就不可能由它得知任何新的消息,这样也就失上了通信的意义。此外,在信号传输过程中不可避免地要受到各种干扰和噪声的影响,这些干扰和噪声都具有随机特性。对于随机信号,不能给出确切的时间函数,只可能知道它的统计特性,如在某时刻取某一数值的概率。确定性信号与随机信号有着密切的联系,在一定条件下,随机信

号也会表现出某种确定性。例如,乐音表现为某种周期性变化的波形,电码可描述为具有某种规律的脉冲波形等。作为理论上的抽象,应该首先研究确定性信号,在此基础上才能根据统计规律进一步研究随机信号的特性。本书只讨论确定性信号。

2. 连续时间信号和离散时间信号

按照时间函数取值的连续性与离散性,可将信号划分为连续时间信号(continuous-time signal)与离散时间信号(discrete-time signal),简称连续信号与离散信号。

如果在所讨论的时间间隔内,除若干不连续的点外,对任意时间值都可以给出确定的函数值,则称为连续时间信号。例如,正弦波和图 1-7 所示的信号都是连续信号。连续时间信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的(只取某些规定值)。时间和幅值都连续的信号又称为模拟信号(analog signal)。在实际应用中,模拟信号和连续信号两个术语常常不予区分。

与连续时间信号相对应的是离散时间信号。离散时间信号在时间上是离散的,只在某些不连续的规定瞬时给出信号值,在其他时间没有定义。给出函数值的离散时间间隔可以是均匀的,也可以是不均匀的。一般情况都采用均匀间隔。这时,自变量 t 简化为用整数序号 n 表示。函数符号记为 $x(n)$,仅当 n 为整数时, $x(n)$ 才有定义。为了突出这一点,也称 $x(n)$ 为离散时间序列(sequence)。如图 1-8 所示的离散时间信号也称为正弦序列。

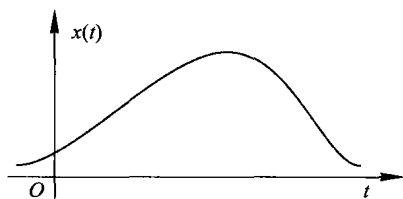


图 1-7 连续时间信号

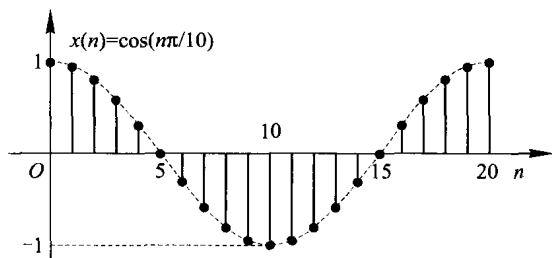


图 1-8 离散时间信号

需要注意的是:离散时间信号的函数取值可以是连续的。如果离散时间信号的幅值也被限定为某些离散值,即时间与幅度取值都具有离散性,此信号又称为数字信号(digital signal)。

自然界的实际信号多数是连续的,例如声道产生的语音、乐器发出的乐音、连续测量的温度曲线等。离散信号一般源于两种应用情形。一种是事物本身就需要用元素集合或序列的形式来描述,即函数的自变量变化本来就是离散的。如银行发布利率、按固定时间间隔给出的股票市场指数、按年度或月份统计的人口数量或国民生产总值等。另一种情况是为了用计算机或数字信号处理器进行信号处理,在离散的时间点上对连续时间信号抽取样值^①而获取的离散时间序列。例如音频系统的语音或音乐等。

本书将分别讨论连续时间和离散时间信号,通过它们的共同点分享各自的概念与分析方法,结合它们的差异加深对两类信号的理解。利用第 3 章介绍的有关抽样的知识,可以将二者联系起来。

3. 周期信号和非周期信号

确定性信号又可以分为周期信号(period signal)和非周期信号(aperiodic signal)。所谓周期信号就是依一定的间隔周而复始、无始无终的信号。周期信号又可以分为连续时间周期信号和离散周期信号。

连续时间周期信号是在 $(-\infty, \infty)$ 区间,每隔一定时间 T 按相同规律重复变化的信号,如图

^① 这一过程称为抽样(sampling),也称为取样或采样。

1-9(a)所示。连续时间周期信号必须满足

$$x(t - mT) = x(t) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-1)$$

式(1-1)中最小的正值 T 称为信号的最小周期或基波周期 T_0 , 简称周期。在 $x(t)$ 为一个常数的情况下, 基波周期无定义, 因为此时对于任意 T 而言, $x(t)$ 都是周期的, 即最小的正值 T 不存在。

同样, 离散时间周期序列 $x(n)$ 必须满足

$$x(n - mN) = x(n) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-2)$$

式(1-2)中最小的正整数 N 称为序列的最小周期或基波周期 N_0 , 简称周期。如图 1-9(b)所示的周期序列, 其基波周期 $N_0 = 4$ 。

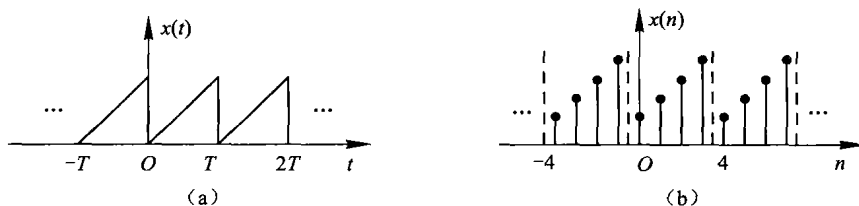


图 1-9 周期信号

4. 能量信号和功率信号

首先介绍信号能量(energy)和信号功率(power)的定义。

连续时间信号的能量定义为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (1-3)$$

离散时间信号的能量定义为

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x(n)|^2 \quad (1-4)$$

如果只关心有限区间 $[t_1, t_2]$ 或 $[n_1, n_2]$ 上的信号能量, 则式(1-3)和式(1-4)可分别写为

$$E = \int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dt \quad (1-5)$$

$$E = \sum_{n=n_1}^{n_2} |x(n)|^2 \quad (1-6)$$

连续时间信号和离散时间信号的平均功率分别定义为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt \quad (1-7)$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 \quad (1-8)$$

当然也可以只考察有限时间区间上的信号平均功率。在不会引起含义混淆的情况下, 可将信号的平均功率简称为信号功率。上述各定义式中的 $|x(t)|$ 或 $|x(n)|$ 表示信号的模, 以便适用于复变函数信号。

信号幅值即函数值的大小不易表征信号的整体特性。信号的能量和信号的平均功率则是信号整体特性的一种度量。

若按式(1-3)或(1-4)计算的信号能量为有限值, 则称为能量有限信号, 简称能量信号。若按式(1-7)或(1-8)计算的信号功率为有限值, 则称为功率有限信号, 简称功率信号。由于这些定义式中的积分或求和是在无限长区间上进行的, 因而能量信号的平均功率趋于零; 而功率信号的能量趋于无穷大。对能量信号来说有 $E < \infty$, $P \rightarrow 0$ 。例如: $x(t) = e^{-\alpha|t|}$ ($\alpha > 0$), 其能量 $E = 1/\alpha$, 而