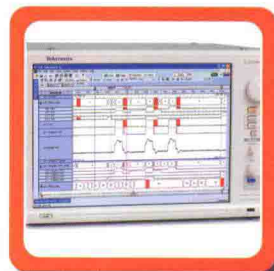




全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

信号分析与处理

◎ 杨述斌 主编



全新视角：以“信号分析”为主题组织和整合课程内容体系及结构
基本理论—信号在系统分析中的应用—信号分析与处理的常用工具
重视实践：精心提供多个随机信号处理和信号分析与处理的仿真实验



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

信号分析与处理

杨述斌 主 编

陈 祯 李 琼 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍信号分析与处理的基本原理、方法及应用,并改变对应课程传统的学习和讲授视角,以“信号分析”为主题视角,按照“课程整体的认识—信号的时域分析—信号的频域分析—信号的复频域分析”的线索与顺序组织和整合课程内容和结构,让学生以信号分析与处理为主线学习和理解整个课程内容;并在讨论完信号分析与处理的基本理论之后,再探讨信号在系统分析中的应用,以及信号分析与处理中常用的工具——滤波器;最后讲述随机信号处理和信号分析与处理的仿真实验。整本教材编写自然顺畅,契合学生学习思维的习惯,同时也兼顾内容的完整性和课程的工程性。

本书可作为仪器仪表及自动化类相关专业的本科生或相关工科类专业研究生“信号分析与处理”课程教材,并可供有关教师和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

信号分析与处理/杨述斌主编. —北京:电子工业出版社,2014.3

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-21900-9

I. ①信… II. ①杨… III. ①信号分析—高等学校—教材②信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第274388号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:周宏敏 文字编辑:张迪

印刷:涿州市京南印刷厂

装订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:352千字

印次:2014年3月第1次印刷

定价:39.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

《全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材》

编 委 会

主任委员：许贤泽

副主任委员：谭跃刚

委 员：刘波峰 郝晓剑 杨述斌 付 华
赵 燕 黄安贻 郭斯羽 武洪涛
靳 鸿 陶晓杰 戴 蓉 李建勇
秦 斌 王 欣 黎水平 孙士平
冯先成 白福忠 张国强 王后能
张雪飞 谭保华 周 晓 王 敏

前 言

当今是信息时代，在科学研究、生产建设和工程实践中，信号分析与处理技术的应用日益广泛，正在发挥着越来越重要的作用。它是一门理论和实践密切结合的学科，是理论性和工程性都很强的学科。其理论性体现在：它综合应用数学、电路理论、电子技术等领域的基础理论和方法发展并形成了自己的理论体系，成为通信、雷达、声呐、电声、电视、测控、生物医学工程等众多学科和领域的重要理论基础与技术基础；其工程性体现在：它的应用极为广泛，从科学技术各个领域到国民经济建设的各行业，从国防建设的各种武器装备到总的消费类电子产品的设计与生产，都是信号分析与处理技术的应用领域。正因为信号分析与处理的理论和技术在当今信息世界广泛应用并产生巨大影响，其应用领域在不断地扩展，信号分析与处理课程已经从电子信息工程类专业的专业基础课程扩展成电子信息、自动控制、电子技术、电气工程、计算机技术、测控技术与仪器等众多电类专业的专业基础课程，甚至在很多非电专业中也设置了这门课程。这门课程当前国内外出版了一部分教材，这些教材有两个突出特点：一是按照连续信号处理和离散信号处理两大块分别讲述它们的分析、处理方法与技术；二是把系统分析放在信号分析与处理的理论中穿插讲述。这种教材的编写方式对信息处理专业的学生比较合适，可以让他们很详细地学习和理解信号处理与分析的理论、方法与技术，但是给学生的感觉是重系统的分析与处理，而没能把信号分析与处理的细节及应用能力体现出来，同时需要比较长的教学学时才可系统完整地讲解清楚。针对这一现状，为了突出信号分析与处理课程，以信号分析为主线，能在较少的学时内系统讲授和学习，在编者这几年教授本门课程的经验积累和听取学生学习的反馈意见的基础上，不断修改讲义，从而编写了本教材，以便于学生能在比较短的教学时间内学习信号分析与处理的基本方法与理论，掌握其在各类应用环境下的分析和处理技能。

针对以上教学中存在的实际困难和当前教材的现状，本教材编写的主要思路如下：（1）改变本门课程传统的学习和讲授视角，切实以“信号分析”为主题视角编写组织教材，通过这样的视角让学生在以信号分析为主线学习和理解整个课程内容；（2）以此视角为基础，按照“课程整体的认识—信号的时域分析—信号的频域分析—信号的复频域分析”的线索与顺序组织和整合课程内容及结构；（3）在讨论完信号分析与处理的基本理论后，再探讨信号在系统分析中的应用，以及信号分析与处理中常用的工具——滤波器；（4）最后讲述随机信号处理及信号分析与处理的 9 个仿真实验。整本教材编写自然顺畅，同时兼顾内容的完整性和课程的工程性。同时，本教材具有以下特点：（1）在教学理念和视角上，以信号分析为主线，并以此为基础理解在各类环境中的系统处理应用；（2）在课程结构和内容上更便于学生系统地理解，把信号分析和信号在系统中的处理分开讲述；（3）在学生学习中，使得其对整门课程的整体把握更系统和容易，教学学时可以压缩。总之，在编写风格和内容上实现了创新，编写中体现了近几年在本门课程教学上的改革和经验积累；在整合基础知识与理论体系的前提下，着重讲解创新型人才培养所需的内容和关键点，不进行烦琐的推证，让学生学而有功，学而能用；在实践操作上追求实用，通过实际操作加深对理论知识的理解，强调锻炼学生的思维能力，以及运用概念解决信号分析与处理相



关问题的工程实践能力。

第1章绪论，包括信号及其分类、信号分析与处理系统简介、信号分析与处理的目的和内容、信号分析与处理的发展和应用。从整体上让读者对整门课程有个概括性认识。

第2章信号的时域分析，主要讨论了信号的描述、信号的运算及信号的分解等信号时域中的基本问题。

第3章信号的频域分析，主要讲述了连续信号的频域分析、离散信号的频域分析及能量谱与功率谱的概念，包括信号的傅里叶变换的各种形式，即连续周期信号的傅里叶级数、连续非周期信号的傅里叶变换、序列的傅里叶变换（DTFT）、序列的傅里叶级数（DFS）和有限长序列的傅里叶变换（DFT）。

第4章快速傅里叶变换，主要讨论了快速傅里叶变换（FFT）的原理、实现及应用。

第5章信号的复频域分析，讲解了连续信号的复频域分析即拉普拉斯变换的概念、性质与应用；离散信号的复频域分析即Z变换的概念、性质与应用，以及Z变换、拉普拉斯变换与傅里叶变换的关系。

第6章抽样理论，介绍了时域和频域抽样的基本理论及应用。

第7章信号处理基础，讲述了系统及其性质；信号的线性系统处理，包括时域分析处理、频域分析处理及复频域分析处理方法；现实系统处理中的有限字长效应及量化误差问题。

第8章滤波器，介绍其定义和基本原理，以及滤波器的分类与技术指标；巴特沃兹和切比雪夫I型模拟低通滤波器的设计方法，以及由低通到高通、带通及带阻滤波器的频率变换方法；无限冲激响应数字滤波器和有限冲激响应数字滤波器的设计方法；利用窗口法和切比雪夫逼近法设计出具有线性相位的FIR数字滤波器；滤波器设计中的实际问题。

第9章随机信号，简单讨论随机信号的时域描述、频域描述、典型随机信号及随机信号通过线性系统的分析等。

第10章MATLAB仿真实验，先介绍了MATLAB的基本内容，然后给出了几个实际应用MATLAB进行信号分析与处理的实例。

本书由武汉工程大学杨述斌任主编，武汉理工大学陈祯和武汉工程大学李琼任副主编。其中第1、4、6、7章由杨述斌编写；第5、8、10章由陈祯编写；第2、3、9章由李琼编写；全书由杨述斌提出编写思想和编写提纲，并进行统稿和整理工作。

在本书编写过程中，得到了电子工业出版社、武汉工程大学研究生处及电子工业出版社·全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材专家编审委员会的帮助与指导，并得到“武汉工程大学研究生教材建设资助项目”的资助。在此表示衷心感谢。

尽管我们为编写本书付出了十分的努力和心血，但书中仍存在疏漏或欠妥之处，欢迎广大同行及读者批评指正。

编者

2014年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号及其分类	1
1.1.1 信号的描述	1
1.1.2 信号的分类	1
1.2 信号分析与处理系统简介	3
1.3 信号分析与处理的目的和内容	4
1.4 信号分析与处理的发展和应用	4
第 2 章 信号的时域分析	7
2.1 信号的描述	7
2.2 信号的运算	8
2.3 信号的分解	12
习题	15
第 3 章 信号的频域分析	17
3.1 连续信号的频域分析	17
3.1.1 周期信号的傅里叶级数	17
3.1.2 非周期信号的傅里叶变换	23
3.1.3 傅里叶变换的性质	28
3.2 离散信号的频域分析	33
3.2.1 序列傅里叶变换 (DTFT)	34
3.2.2 周期序列的离散傅里叶级数 (DFS)	38
3.2.3 离散傅里叶变换 (DFT)	44
3.3 能量谱与功率谱	52
习题	54
第 4 章 快速傅里叶变换	57
4.1 FFT 的基本思想	57
4.1.1 直接计算 DFT 的运算量分析	57
4.1.2 改进途径	58
4.2 按时间抽取 (DIT) 的基-2FFT 算法	59
4.2.1 算法原理	59
4.2.2 蝶形、同址、变址运算	63
4.3 按频率抽取 (DIF) 的基-2FFT 算法	68
4.3.1 算法原理	68
4.3.2 按频率抽取法的运算特点	70



4.4	快速傅里叶反变换	71
4.5	快速傅里叶变换 FFT 的应用	72
4.5.1	利用 FFT 对信号进行谱分析	72
4.5.2	线性卷积的 FFT 算法	78
	习题	79
第 5 章	信号的复频域分析	81
5.1	连续信号的复频域分析——拉普拉斯变换	81
5.1.1	拉普拉斯变换	81
5.1.2	拉普拉斯变换的性质	82
5.2	离散信号的复频域分析——Z 变换	86
5.2.1	Z 变换	86
5.2.2	Z 变换的基本性质和定理	87
5.2.3	Z 反变换的方法	91
5.3	Z 变换、拉普拉斯变换与傅里叶变换的关系	93
	习题	94
第 6 章	抽样理论	96
6.1	时域抽样理论	96
6.1.1	理想抽样	96
6.1.2	信号的重建	99
6.1.3	离散时间信号的抽样	100
6.2	抽样 Z 变换——频域抽样理论	102
	习题	107
第 7 章	信号处理基础	108
7.1	系统及其性质	108
7.1.1	系统的概念	108
7.1.2	系统的分类及描述	109
7.2	信号的线性系统处理	111
7.2.1	时域分析法	111
7.2.2	频域分析法	115
7.2.3	复频域分析法	116
7.3	有限字长效应及量化误差	119
7.3.1	有限字长效应	120
7.3.2	信号的量化误差	121
7.3.3	A/D 变换器中的量化效应	123
	习题	124
第 8 章	滤波器	126
8.1	滤波器概述	126
8.2	模拟滤波器	130



8.2.1	理想低通滤波器的频率响应	130
8.2.2	巴特沃兹低通滤波器	131
8.2.3	切比雪夫滤波器	133
8.3	数字滤波器	134
8.3.1	数字滤波器的基本概念	134
8.3.2	IIR 数字滤波器	134
8.3.3	FIR 数字滤波器	149
	习题	163
第 9 章	随机信号	165
9.1	随机信号的时域描述	165
9.1.1	随机信号的四种形式	165
9.1.2	时域离散随机信号的统计描述	166
9.1.3	随机序列的数字特征	167
9.2	随机信号的频域分析	168
9.2.1	平稳随机过程的功率谱密度性质	168
9.2.2	白噪声	168
9.3	典型随机信号	169
9.4	随机信号通过线性系统的分析	171
9.4.1	线性系统的基本理论	172
9.4.2	随机过程通过线性系统	172
9.4.3	白噪声通过线性系统	173
	习题	176
第 10 章	MATLAB 仿真实验	177
10.1	MATLAB 简介	177
10.2	信号的产生及运算与图示	178
10.2.1	信号的产生与图示	178
10.2.2	信号的运算	188
10.3	微分和差分方程的求解	189
10.3.1	微分方程的求解	189
10.3.2	差分方程的求解	191
10.4	连续时间信号的频谱分析	192
10.4.1	直接调用专用函数法	192
10.4.2	傅里叶变换的数值计算实现法	193
10.5	离散时间信号的频谱分析	195
10.5.1	求取离散系统频率响应	195
10.5.2	离散傅里叶变换和反变换	197
10.6	连续时间信号的复频域分析	199
10.6.1	部分分式展开	199



10.6.2	拉普拉斯变换和反变换	199
10.6.3	求系统零、极点及系统特性	200
10.7	离散系统的复频域分析	201
10.7.1	正/反 Z 变换	201
10.7.2	离散系统的单位阶跃响应函数: <code>dstep</code>	202
10.8	IIR 数字滤波器的设计	203
10.9	FIR 数字滤波器的设计	206
参考文献		209

第1章 绪论

在工程和科学技术领域中常常需要对信号进行分析与处理，随着计算机和信息科学的飞速发展，信号分析与处理在各行各业的应用越来越广泛，所起的作用也越来越大。那么，什么是信号？它是如何分类？信号分析与处理的目的、研究的内容及特点是什么？具体的信号分析与处理有哪些方面的应用，以及它的发展趋势和特点又如何？这些问题的回答即为本章讨论的主要内容。

1.1 信号及其分类

信息是信号的具体内容，而信号是信息的载体，是信息的物理表现形式，反映了物理系统的状态和特性，是信息的函数。广义来讲，任何带有信息的事物都可称为信号，如电压、电流、温度、湿度、压力、语音，等等，它表现为一种物理体现，是一个随机变化的物理量。为了有效地传播和利用信息，常常需要将信息转换成便于传输和处理的信号。现实中，信号我们并不陌生，如学校上课时的铃声——声信号，表示该上课了；十字路口的红绿灯——光信号，指挥交通；电视机天线接受的电视信息——电信号；广告牌上的文字、图像信号，等等。

1.1.1 信号的描述

信号是信息的一种物理体现，它一般是随时间或位置变化的物理量。信号按物理属性分为电信号和非电信号，它们可以相互转换。电信号容易产生、便于控制、易于处理。本课程讨论电信号——简称“信号”。电信号的基本形式为随时间变化的电压或电流。描述信号的常用方法：

- (1) 表示为时间的函数；
- (2) 信号的图形表示——波形。

一般情况下，“信号”与“函数”两词在本课程中常相互通用。

1.1.2 信号的分类

1. 确定信号和随机信号

可以用确切的函数表示的信号称为确定信号或规则信号，如正弦信号。

若信号不能用确切的函数描述，它在任意时刻的取值具有不确定性，只可能知道它的统计特性，如在某时刻取某一数值的概率，则这类信号称为随机信号或不确定信号，如电子系统中的起伏热噪声、雷电干扰信号就是两种典型的随机信号。

研究确定信号是研究随机信号的基础，本课程只讨论确定信号。



2. 连续信号和离散信号

根据信号定义域的特点可把信号分为连续时间信号和离散时间信号。

连续时间信号：在连续的时间范围内（ $-\infty < t < \infty$ ）有定义的信号称为连续时间信号，简称连续信号，实际中也常称为模拟信号。这里的“连续”指函数的定义域——时间是连续的，但可含间断点，至于值域可连续也可不连续。

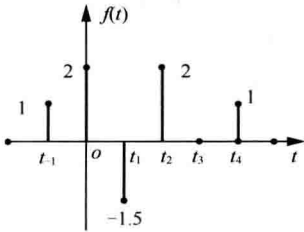


图 1-1 离散时间信号

离散时间信号：仅在一些离散的瞬间才有定义的信号称为离散时间信号，简称离散信号，实际中也常称为数字信号。这里的“离散”指信号的定义域——时间是离散的，它只在某些规定的离散瞬间给出函数值，其余时间无定义，如图 1-1 中的 $f(t)$ 仅在一些离散时刻 t_k ($k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 才有定义，其余时间无定义。相邻离散点的间隔 $T=t_{k+1}-t_k$ 可以相等也可不等。通常取等间隔 T ，则离散信号可表示为 $f(kT)$ ，简写为 $f(k)$ ，这种等间隔的离散信号也常称为序列，其中 k 称为序号。

3. 周期信号和非周期信号

周期信号 (period signal) 是定义在 $(-\infty, \infty)$ 区间，每隔一定时间 T (或整数 N)，按相同规律重复变化的信号。连续周期信号 $f(t)$ 满足：

$$f(t)=f(t+mT), \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

离散周期信号 $f(k)$ 满足：

$$f(k)=f(k+mN), \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

满足上述关系的最小 T (或整数 N) 称为该信号的周期。

不具有周期性的信号称为非周期信号。

4. 能量信号与功率信号

将信号 $f(t)$ 施加于 1Ω 电阻上，它所消耗的瞬时功率为 $|f(t)|^2$ ，在区间 $(-\infty, \infty)$ 的能量和平均功率定义为：

(1) 信号的能量 E
$$E \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt$$

(2) 信号的功率 P
$$P \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt$$

若信号 $f(t)$ 的能量有界，即 $E < \infty$ ，则称其为能量有限信号，简称能量信号，此时 $P=0$ 。

若信号 $f(t)$ 的功率有界，即 $P < \infty$ ，则称其为功率有限信号，简称功率信号，此时 $E=\infty$ 。相应的，对于离散信号，其也有能量信号、功率信号之分。

(1) 若满足 $E = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |f(k)|^2 < \infty$ 的离散信号，称为能量信号。

(2) 若满足 $P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2} |f(k)|^2 < \infty$ 的离散信号，称为功率信号。

时限信号 (仅在有限时间区间不为零的信号) 为能量信号；周期信号属于功率信号，而非周期信号可能是能量信号，也可能是功率信号。



有些信号既不是属于能量信号也不属于功率信号，如 $f(t)=e^t$ 。

5. 一维信号与多维信号

从数学表达式来看，信号可以表示为一个或多个变量的函数称为一维或多维函数。语音信号可表示为声压随时间变化的函数，这是一维信号。而一张黑白照片上的每个点（像素）具有不同的光强度，任一点又是二维平面坐标中两个变量的函数，这是二维信号。还有更多维变量的函数的信号。本课程只研究一维信号，且自变量多为时间。

6. 因果信号与反因果信号

常将 $t=0$ 时接入系统的信号 $f(t)$ ，即在 $t<0$ 时 $f(t)=0$ 的信号称为因果信号或有始信号，阶跃信号就是典型的一个，而将 $t\geq 0$ 时 $f(t)=0$ 的信号称为反因果信号。

1.2 信号分析与处理系统简介

系统和信号相互依存。要产生信号，并对信号进行传输、处理、存储和转化需要一定的物理装置（系统）；系统在外加信号的作用下将产生某种反应，这种外加信号称为系统的输入或激励，相应的反应称为系统的输出或响应。系统和系统之间通过信号来联系，则信号在系统之间，以及系统内部流动。研究信号的分析与处理，必须要对系统进行研究。

按照对信号分析与处理方法的不同，有模拟信号处理系统和数字信号处理系统。

(1) 模拟信号处理系统输入的是模拟信号，通过模拟元件 RLC，以及模拟电路构成的模拟系统的加工处理，输出的仍然是模拟信号。模拟滤波器是最典型的模拟信号处理的例子。

(2) 数字信号处理系统是 20 世纪 60 年代以后发展起来的技术，它依赖于大规模集成电路和数字处理算法的发展，其核心是用数字计算机的运算功能代替模拟电路装置，达到信号加工变换的目的，其基本组成结构如图 1-2 所示。

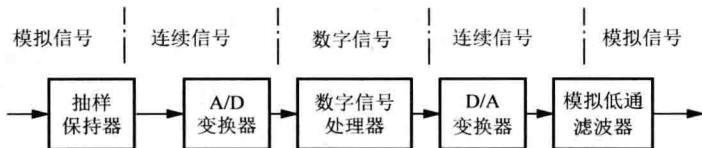


图 1-2 数字信号处理系统的基本组成结构

模拟的输入信号首先通过一个抽样保持器，将输入信号的最高频率限制在一定的范围内，以避免抽样时频谱混叠，然后经过 A/D 变换器，实现把模拟信号变为数字信号，得到的数字信号在经过数字信号处理器（通用或专用计算机或其他信号处理设备）进行分析与处理，变为所期望的另一个数字信号，之后，通过 D/A 变换器转换为模拟信号，再经过平滑滤波进而得到所需信号以便利用或控制。数字信号处理的实现就是把它常用的 3 种运算形式：加法、乘法和存储（延迟）以一定方式实现，它大致可分为如下几种方式。

1. 硬件方式

采用 3 种运算器，即加法器、乘法器、延时器及其组合设计适合于各种目的的数字电路系统，以完成序列运算。在数字信号处理中，硬件电路快速处理是一大优点。现在结合



嵌入式系统理念设计的数字电路对处理数字序列有很大好处。

2. 软件方式

一般来说,在通用计算机上或嵌入式系统上,采用高级语言编制各种需要的计算程序可以达到处理数字信号的目的。但软件方式因为速度慢的原因适合于对实时性要求较低或不要求实时性的场合。应该注意的是,随着计算机性能的提高,实时性要求也在变化,过去由于条件限制,即使是硬件的实时性也是有一定的延迟的,而今用软件方式同样可以达到实时性处理的要求。

3. 数字信号处理器(DSP)方式

现在处理数字信号的主要方式还是各种数字信号处理器(如流行的美国TI公司的TMS320系列),它结合软件和硬件的方式,利用设计特殊的数字信号处理芯片及存储器构成处理硬件电路系统,其中采用高级语言编制的程序来完成运算。DSP处理方式灵活方便,随着集成电路的发展,已经能达到很高的速度,可对数字图像进行实时处理,已经被广泛应用于包括通信工程在内的领域之中。

1.3 信号分析与处理的目的是内容

信号是信息的载体,为了有效地获取和利用信息,必须对信号进行分析和处理。人们对信息的利用程度在一定意义上取决于信号分析与处理的技术。

信号分析是通过解析或测试的方法寻找信号的特征,从而了解其特性、掌握其规律。也就是从客观上认识信号,是获取信号源或信号传递系统特征的重要手段。信号处理是指为了特定目的,通过对信号的变换和加工来改造信号的过程。例如,为了有效地利用信号中包含的有用信息,采用一定手段剔除原始信号中混杂的噪声,削弱多余的内容,这就是一个基本的信号处理过程。因而,信号处理也可理解为为了特定目的,通过一定的手段改造信号的过程。由此可见,尽管信号分析和处理是有一定区别的两个概念,两者的侧重点不同,采用的方法和手段也不同,但它们是互相关联的两个方面,两者密不可分。只有通过信号的分析,充分了解信号的特性,才能有效地对它进行处理和加工,可见信号分析是信号处理的基础。另一方面,通过对信号的加工和变换,可以突出信号的特征,有利于有效地认识信号的特性,从这一意义来讲,信号处理是信号分析的手段。然而,无论认识信号还是改造信号,它们共同的目的都是为了充分地从信号中获取有用信息并实现对这些信息的有效利用,两者是互相关联、密不可分的。

数字处理方法相比模拟处理方法具有精度高、稳定性好、灵活性强、集成度高和便于多维处理等优势。

1.4 信号分析与处理的发展和应用

信号分析与处理是以研究信号与信息分析与处理为主体,包含信息获取、变换、存储、传输、交换、应用等环节中的信号与信息分析与处理,是信息科学的重要组成部分,



其主要理论和方法已广泛应用于信息科学的各个领域，且不再只是信息科学领域的专利，而成为相当广泛的科学与工程领域中十分有用的概念和方法，是当今世界科技发展的重点，也是国家科技发展战略的重点。

信号分析与处理最初起源于17世纪和18世纪数学的一个学科，它的发展历程主要分为模拟和数字信号处理。模拟信号处理是主要建立在连续时间信号（模拟信号）及连续时间系统（模拟系统）的基础上；数字信号处理是针对数字信号和数字系统，用数值计算的方法，完成对数字信号的处理。近50年来，数字信号处理已逐渐发展成为一门非常活跃、理论与实践紧密结合的应用基础学科，这些发展变化主要表现在以下几个方面。

(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，从而推动着数字信号处理技术的前进；

(2) 快速傅里叶变换（FFT）的提出，在大多数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，而且还可以用数字部件组成的专用硬件来实现。很多通用硬件已经单片机化，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，在凡是需要对各种各样的信号进行谱分析、滤波、压缩等领域中有着越来越多的应用，如数字信号处理在语音处理、通信系统、声呐雷达、控制系统等有着广泛应用，主要体现在以下9个方面。

(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，如二维或三维图形处理、压缩与传输、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。

其中，在通信领域的应用十分宽广，尤其是当下移动通信技术发展，3G乃至4G技术的出现，使得数据的无线传递更加频繁，语音的传输，以及信息加密、信号复用等的作用也越加显得突出。只有通过更加先进的信号分析处理技术才能使得移动通信可以以更快、更安全的方式实现通信，而物联网技术的出现使得传统互联网的应用领域极大地扩展，也使得各种通信方式更加紧密的联系在一起。在其中重要组成之一的无线传感网中，每一个节点既是信号的接收端，又是发送端，同时在一定空间内传递信号数量也大量增加，受到干扰的可能也会大大增加，则需要通过信号与信息处理技术对信号进行压缩、滤波、纠错，



等等，以高效而准确地传递信息。除了传统通信领域的应用外，数字信号处理在医学中的应用也日益广泛，如对脑电图和心电图的分析、胎儿心音的自适应检测等。生物医学信号检测是对生物体中包含的生命现象、状态、性质和成分等信息进行检测和量化的技术，绝大部分生物医学信号都是信噪比很低的微弱信号，且一般都是伴随着噪声和干扰的信号，而对于此类信号则必须采用抑制噪声的处理技术。生物医学信号是从被干扰和噪声淹没的信号中提取有用的生物医学信息特征，它涉及生物体各层次的生理、生化和生物信号，受到人体诸多因素的影响，因而有着一般信号所没有的特点，如信号弱、噪声强、频率范围低、随机性强等。

信号处理已为通信技术的发展提供了多种分析工具（如压缩、转换编码、过滤、去噪、检测、评估和性能评价等工具），也提供了多种实现工具，同时也促使通信技术领域划时代事件的产生（如速度和视频编码器、调制解调器、均衡器和天线阵列等的出现），加上半导体技术的发展、计算和通信设备的集成、通过 WWW 的广泛的互联网的访问、线连接的迅速发展，以及终端用户对蜂窝式移动服务需求的增加，所有这些促使 IEEE 信号处理组织力争实现“任何人、任何时间、任何地方”都能实现通信的梦想。但这也存在艰难的技术挑战，需要新的理论和复杂的信号处理技术，既包括高速光纤连接，又包括无线、有线等未来多媒体通信网络的设计。

信号处理的特点：以算法为中心，更加注重实现与应用。信号处理向着非平稳信号处理、非高斯信号处理、非线性信号处理的方向发展，并与各种智能技术相结合，主要指神经网络、模糊系统、进化计算，也包括自适应技术、混沌技术等。同时，信号处理也向着多维、多谱、多分辨率、多媒体方向发展，这些技术的发展必定将把信号处理理论和技术推向更高的发展阶段。

第2章 信号的时域分析

对于给定的激励，根据描述系统响应与激励之间关系的微分方程求得其响应的方法，由于分析是在时间域内进行的，则称为时域分析。本章将研究线性时不变（LTI）系统的时域分析方法。以时间为自变量描述物理量的变化是信号最基本、最直观的表达形式。在时域内对信号进行滤波、放大、统计特征计算、相关性分析等处理，即为信号的时域分析。

时域分析方法有着广泛的应用，例如，可以有效提高信噪比、求取信号波形在不同时刻的相似性和关联性、获得反映机械设备运行状态的特征参数、为机械系统动态分析和故障诊断提供有效的信息。

本章将在第1章讨论信号和系统的基本概念、信号的分类、基本连续信号的基础上对信号的描述、信号的运算和信号的分解进行介绍。

2.1 信号的描述

这个世界上到处都充满了信号，无论是来自自然的，还是人们发出的。例如，在我们说话时气压的变化、一天中气温的高低，以及心脏产生的周期性心电信号。信号代表着信息，一般而言，信号不能直接表达所需的信息，而且还会受到干扰，在这种意义上，信号分析和处理构成了对有用信号进行放大、提取、保存或传输的基础。由于电信号比较容易处理，所以，在进一步处理信号之前，一般要将原始信号（气压、温度、机械位移、速度等）转换为电信号。在电系统中，信号的两种主要形式是电压信号和电流信号。

信号可描述范围极其广泛的一类物理现象。信号可用许多方式来表示。

在物理上，信号总是信息或消息寄寓变化的形式之一。信号是信息的一种物理体现，它一般是随时间或位置变化的物理量。信号按物理属性分：电信号和非电信号，它们可以相互转换。电信号容易产生、便于控制、易于处理。本课程将讨论电信号——简称“信号”。

为了分析信号，人们把信号用一个数学符号来代表，该信号的变化规律用含有一个或多个自变量的函数来表示，而形态上，信号表现为一种波形，可以提供更直观的分析。

下面以一类普通的基础信号为例。正弦信号是常用的一类信号，它可以用来表示音叉发出的乐音。音叉在敲击时会振动并发出一个单纯的声音，这个声音具有单一的频率——音叉的固有频率，440Hz A 调音叉将产生频率为440Hz 的声音音调，西方乐理中，A440 乃是中央C上方的A 音符，为钢琴、小提琴，以及其他乐器的频率校准标准。乐器440Hz A 调音叉图片如图2-1所示，其音叉信号波形如图2-2所示，数学形式为 $y = \sin(2\pi \times 440 \times t)$ 。

信号总是直接或间接的和一些物理量相关联，例如，电压、电流、电阻、声压、声强、温度、光强，等等。信

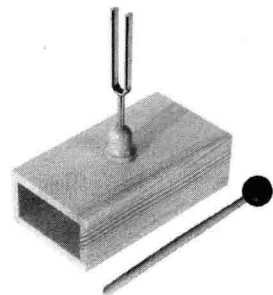


图2-1 乐器440Hz A 调音叉图片