



普通高等教育“十五”  
国家级规划教材



普通高等教育  
电气工程与自动化类  
规划教材

SIGNAL ANALYSIS AND PROCESSING

# 信号分析与处理

第2版

赵光宙 主编

.6

37

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十五”国家级规划教材  
普通高等教育电气工程与自动化类规划教材

# 信号分析与处理

第2版

赵光宙 主 编



机械工业出版社

本教材是普通高等教育“十五”国家级规划教材，是教育部“面向21世纪电气信息类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”项目的成果，是在原面向21世纪课程教材和普通高等教育机电类规划教材《信号分析与处理》的基础上修订而成。修订后的第二版较好地克服了原教材的一些缺陷，各章节内容更合理、流畅。

本教材以系统介绍信号分析、处理的基本概念、原理、技术、方法为主线，与《自动控制理论》有明确的分工和很好的衔接，使二者相辅相成，共同构成关于信号与系统的完整的工程科学基础。本教材还兼顾电气工程与自动化类专业的特点，介绍有关的信号领域知识以及随机信号分析与处理的基础知识和有关新技术。全书分为六章，内容包括：绪论、连续信号分析（时域、频域、复频域）、离散信号分析（时域、频域、复频域）、信号处理基础、模拟和数字滤波器、随机信号分析与处理基础。附录还介绍了基于MATLAB的信号分析与处理基础。每章内容都力求简单扼要，叙述深入浅出，并尽量体现物理意义和工程背景，克服冗长的数学推导。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程等电气信息类专业的“信号分析与处理”课程教材，特别适用于同时开设有“自动控制理论”课程的有关专业学习信号领域知识之用，并可作为其它工科类专业的本科生、研究生及从事电气工程、自动化等领域工作的科技工作者的参考书。

## 图书在版编目（CIP）数据

信号分析与处理/赵光宙主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2006.4（2007.6重印）

普通高等教育“十五”国家级规划教材

普通高等教育电气工程与自动化类规划教材

ISBN 978-7-111-08492-1

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

中国版本图书馆CIP数据核字（2006）第013936号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：韩雪清

责任编辑：王小东 版式设计：张世琴

责任校对：姚培新 责任印制：洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007年6月第2版·第3次印刷

184mm×260mm·22.25印张·552千字

标准书号：ISBN 978-7-111-08492-1

定价：30.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

本教材的第1版出版已有4年多时间,在这期间我们注意到:①以信号分析与处理为基础的信息学科及技术在人们的经济活动、社会生活等各个方面所产生的影响力越来越大,有关信号的知识已经成为大家的所需;②各高等学校电气工程与自动化类专业越来越重视信号分析与处理课程的建设,许多学校正在把它安排为学校或学院平台课,还有更多的学校正在开设或者准备开设这门课程。因此,一本能体现信号分析、处理基础概念、原理和方法,反映电气工程与自动化类专业特点的好的教材已经为广大师生所求。但是由于各种原因,本教材的第1版距离大家的要求有相当大的距离,特别是当时交流不够,各章的内容连贯性、统一性较差,为此我们在原教材的基础上,广泛提取反馈意见,对本教材做了较详细的修订,现在出版的第2版被列入“普通高等教育‘十五’国家级规划教材”出版计划。与第1版相比较,它有如下特点:

1. 仍保持了原教材的基本框架,紧紧抓住信号这条主线,重点介绍信号分析、处理的基本原理和方法,尽量避开与《自动控制理论》重叠的内容,并兼顾到电气工程与自动化类专业的特点和信号分析、处理的新方法、新技术。

2. 按与连续时间信号分析相对应的思路重新编写了第三章离散时间信号分析的内容,使原本比较繁杂的离散时间信号分析的内容(包括离散傅里叶级数DFS、离散时间傅里叶变换DTFT、离散傅里叶变换DFT、快速傅里叶变换FFT等)更易理解和应用。

3. 从原理和应用出发,大幅度地修订了第五章滤波器的内容。

4. 将第六章随机信号分析与处理基础的内容作了适当修改,使之更易于理解和贴近工程应用

5. 作为附录,增加了基于MATLAB的信号与处理基础,使广大读者学习了基本概念、方法以后能在计算机上对信号的分析、处理进行仿真。作为课程实验的一种好的方法,通过MATLAB仿真,一方面能加深对已学概念、原理的理解,另一方面也为对信号分析方法的研究、信号处理系统的设计打下良好基础。

教材内容的修订过程中,齐冬莲副教授主要完成了第五章和附录的编写以及第六章部分内容的修订工作,刘妹琴副教授参与了第三章的编写工作。这次修订工作及本教材第2版的出版力图克服第1版教材的缺陷,使全书内容更合理、更流畅,但由于作者各方面条件所限,书中难免还有不少不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2005年12月18日于求是园

# 第 1 版前言

本教材是普通高等教育机电类规划教材,并被教育部批准列为“面向 21 世纪课程教材”。

教育部 1998 年颁布的新专业目录中,把原强电类专业归并为电气工程及其自动化专业,把自动化类专业(包括工业自动化、自动控制等专业)归并为自动化专业,在同时公布的引导性目录中,又把以上两个专业(自动化专业为其中一部分)进一步合并成为强弱电结合,软硬件结合,电气工程专业知识与自动化、信息技术基础知识相结合,宽口径的电气工程与自动化专业,这一新专业的设置是科学技术发展到信息时代的结果,必将促进新兴的信息学科向传统电工学科的渗透。本教材正是适应电气工程与自动化专业(或电气工程及其自动化专业和自动化专业)以及相关专业的需要而编写的。电气工程与自动化专业涉及电力系统、电机系统、电力电子装置及系统、工业自动化系统等,众所周知,系统和信号是息息相关、密不可分的,从某种意义上说,系统是为了达到特定的目的对信号进行处理、变换的器件、装置、设备及其组合,而信号是系统要处理、加工和变换的对象,可以说,系统的发展与信息的利用程度紧密相连,而信息的利用程度则有赖于信号的分析、处理技术。实际上,电气系统和自动化系统都广泛地涉及信号分析和处理技术,自动化系统中按一定的控制规则得出的控制信号,系统状态的估计,控制对象数学模型的确定,系统测量噪声的剔除,直至自适应控制、智能控制等都通过信号的分析与处理来实现;电机、电子系统的故障分析和诊断,电力系统的微机保护、谐波抑制等更是信号分析与处理技术的直接应用例子。随着电工学科的进一步发展,信号处理技术对它的作用和影响必将越来越大。

本教材考虑电气工程与自动化专业或相关专业已经在“自动控制理论”课程中较系统地学习了系统的时域、频域、复频域分析方法和设计方法,因此,紧紧抓住信号这一主线,重点介绍信号分析、处理的基本原理和方法,尽量避免《自动控制理论》中已介绍的内容,并兼顾专业特点,从信号处理角度出发,适当介绍系统辨识、最优估计等内容。因此,本教材有别于传统的《信号与系统》教材,克服了它与《自动控制理论》有关系统内容的重叠。为适应现代信号处理技术的飞速发展,本教材简要地介绍了随机信号分析与处理的基础知识,自适应信息处理及小波分析等新技术、新方法,这些章节前标有\*号,供大家选用。

本教材由浙江大学赵光宙任主编,四川大学舒勤任副主编。其中绪论、第一章、第三章、第五章由赵光宙编写,第二章、第四章由舒勤编写。浙江大学齐冬莲博士承担了大部分书稿的计算机录入工作。

在本教材的大纲编制过程中,上海大学陈伯时教授、西安交通大学王兆安教授等提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于作者学识所限,加上编写时间仓促,书中在内容取材、概念阐述、文字表达等方面必定存在不少欠妥之处甚至错误,敬请读者批评指正。

编者于浙江大学

2001 年 6 月 6 日

# 目 录

<b>第 2 版前言</b>	
<b>第 1 版前言</b>	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 信号及其分类 .....	1
一、信号的概念 .....	1
二、信号的分类 .....	1
第二节 信号的分析与处理概述 .....	4
第三节 自动控制系统中的信号分析 与处理 .....	5
习题 .....	6
<b>第二章 连续信号的分析</b> .....	8
第一节 连续信号的时域描述和分析 .....	8
一、连续信号的时域描述 .....	8
二、连续信号的时域运算 .....	12
三、信号的分解 .....	19
习题 .....	23
第二节 连续信号的频域分析 .....	24
一、周期信号的频谱分析 .....	25
二、非周期信号的频谱分析 .....	34
三、傅里叶变换的性质 .....	45
习题 .....	61
第三节 连续信号的复频域分析 .....	65
一、信号的拉普拉斯变换 .....	65
二、信号的复频域分析 .....	74
习题 .....	78
第四节 信号的相关分析 .....	81
一、相关系数 .....	81
二、相关函数 .....	84
三、相关定理 .....	87
习题 .....	89
<b>第三章 离散信号的分析</b> .....	91
第一节 离散信号的时域描述和分析 .....	91
一、信号的采样和恢复 .....	91
二、时域采样定理 .....	92
三、频域采样定理 .....	95
四、离散信号的描述 .....	97
五、离散信号的时域运算 .....	101
第二节 离散信号的频域分析 .....	108
一、周期信号的频域分析 .....	108
二、非周期信号的频域分析 .....	115
三、离散傅里叶变换 (DFT) .....	121
第三节 快速傅里叶变换 (FFT) .....	128
一、快速傅里叶变换的基本思路 .....	128
二、基 2 FFT 算法 .....	130
三、FFT 的应用 .....	134
第四节 离散信号的 Z 域分析 .....	139
一、离散信号的 Z 变换 .....	139
二、Z 变换与其它变换之间的关系 .....	152
第五节 关于信号分析的小结 .....	154
习题 .....	155
<b>第四章 信号处理基础</b> .....	158
第一节 系统及其性质 .....	158
一、系统的描述 .....	158
二、系统的性质 .....	159
第二节 信号的线性系统处理 .....	163
一、时域法分析 .....	163
二、频域法分析 .....	173
三、复频域分析 .....	179
* 第三节 解卷积 (逆滤波和系统辨识) .....	182
一、系统辨识问题 .....	184
二、逆滤波问题 .....	187
三、同态系统解卷积 .....	190
第四节 数字信号处理技术 .....	193
一、数字信号处理的特点 .....	193
二、数字信号处理的实现 .....	194
三、有限字长对实现数字信号处理 的影响 .....	195
习题 .....	202
<b>第五章 滤波器</b> .....	207
第一节 滤波器概述 .....	207
一、滤波及滤波器的基本原理 .....	208
二、滤波器的分类 .....	208
三、滤波器的技术要求 .....	209
第二节 模拟滤波器 .....	211

一、概述 .....	211	第三节 最优线性滤波 .....	265
二、巴特沃思 (Butterwoth) 低通 滤波器 .....	212	一、维纳滤波 .....	265
三、切比雪夫 (Chebyshev) 低通 滤波器 .....	216	二、卡尔曼滤波 .....	269
四、模拟滤波器的频率变换 .....	222	* 第四节 近代信号分析与处理简介 .....	277
五、RC 有源滤波器 .....	225	一、参数模型及功率谱估计 .....	277
习题 .....	227	二、自适应信号处理 .....	282
第三节 数字滤波器 .....	228	三、信号的时-频域分析 .....	291
一、概述 .....	228	四、信号的小波分析 .....	294
二、无限冲激响应 (IIR) 数字 滤波器 .....	229	习题 .....	302
三、有限冲激响应 (FIR) 数字 滤波器 .....	238	<b>附录 基于 MATLAB 的信号分析与 处理基础</b> .....	305
习题 .....	244	第一节 MATLAB 快速入门 .....	305
<b>第六章 随机信号分析与处理</b> <b>基础</b> .....	246	一、MATLAB 简介 .....	305
第一节 随机信号的描述 .....	246	二、MATLAB 的命令窗口、图形窗口、 在线帮助 .....	305
一、随机信号及其概率结构 .....	246	三、M 文件编程 .....	309
二、随机信号在时域的数字特征 .....	248	四、Simulink 简介 .....	313
三、随机信号的频域描述 .....	253	第二节 基于 MATLAB 的信号分析与 处理 .....	314
第二节 随机信号通过线性系统的 分析 .....	257	一、连续时间信号分析 .....	314
一、平稳随机信号通过连续系统 .....	257	二、离散时间信号分析 .....	319
二、平稳随机信号通过离散系统 .....	260	三、连续时间系统分析 .....	327
三、过渡过程分析 .....	262	四、离散时间系统分析 .....	335
		五、模拟滤波器的设计 .....	341
		六、数字滤波器的设计 .....	344
		<b>参考文献</b> .....	350

# 第一章 绪 论

## 第一节 信号及其分类

### 一、信号的概念

什么是信号?“信号”一词在人们的日常生活和社会活动中并不陌生,例如时钟报时、汽车喇叭的声音、交叉路口的红绿灯、战场上的信号弹、电子计算机内部以及它和外围设备之间联络的电信号等,都是人们熟悉的信号。但是,要严格地给信号下定义,必须搞清它和信息、消息之间的联系。

我们生活在信息时代,信息对每个人来说都具有重要的意义。信息是指人类社会和自然界中需要传送、交换、存储和提取的抽象内容。首先,信息具有客观性,它存在于一切事物之中,事物的一切变化和运动都伴随着信息的交换和传送。同时,信息具有抽象性,只有通过一定的形式才能把它表现出来。

由于信息的抽象性,为了交换和传送,必须通过一定的表现形式将它表示出来。人们把表示信息的语言、文字、图像、数据等称为消息,而信息是消息之中赋予人们新知识与新概念的内容。可见,信息是消息的内容,而且是预先不知道的内容。

一般情况下,消息不便于传送和交换,往往需要借助于某种便于传送和交换的物理量作为运载手段,我们把声、光、电等运载消息的物理量称为信号,它们是时间或空间的函数,所携带的消息则体现在它们的变化之中。例如,甲通过电话告诉了乙一件乙不知道的事情,我们说乙得到了信息,它是客观存在的,但是它是乙从甲的语言这一表现形式中得到的,而电话传输线上变化的电物理量是运载语言消息、传送信息的信号。在作为信号的众多物理量中,电是应用最广泛的物理量,因为它容易产生、传输和控制,也容易实现与其它物理量的相互转换。因此,我们通常所指的信号主要是电信号。

### 二、信号的分类

信号作为时间或空间的函数可以用数学解析式表达,也可以用图形来表示。我们观测到的信号一般是一个或一个以上独立变量的实值函数,具体地说,可以是时间或空间坐标的纯量函数。例如由语音转换得到的电信号,信号发生器产生的正弦波、方波等信号都是一个独立变量时间  $t$  的函数  $x(t)$ ; 一幅静止的黑白平面图像,由位于平面不同位置呈不同亮度(或灰度)的像点组成,是两个独立变量的函数  $I(x, y)$ ; 而活动的黑白电视图像,像点的亮度还随时间  $t$  变化,是三个独立变量的函数  $I(x, y, t)$ 。具有一个独立变量的信号函数称为一维信号,同样,有二维信号、三维信号等多维信号。本书主要以一维信号  $x(t)$  为对象,其中独立变量  $t$  根据具体情况可以是时间,也可以是其它物理量。

根据信号所具有的时间函数特性,可以分为确定性信号与随机信号、连续信号与离散信



号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号，现分述如下。

### 1. 确定性信号与随机信号

按确定性规律变化的信号称为确定性信号。确定性信号可以用数学解析式或确定性曲线准确地描述，在相同的条件下能够重现，因此，只要掌握了变化规律，就能准确地预测它的未来。例如正弦信号，它可以用正弦函数描述，对给定的任一时刻都对应有确定的函数值，包括未来时刻。

不遵循任何确定性规律变化的信号称为随机信号。随机信号的未来值不能用精确的时间函数描述，无法准确地预测，在相同的条件下，它也不能准确地重现。马路上的噪声、电网电压的波动量、生物电、地震波等都是随机信号。

### 2. 连续信号与离散信号

按自变量  $t$  的取值特点可以把信号分为连续信号和离散信号。连续信号如图 1-1a 所示，它的描述函数的定义域是连续的，即对于任意时间值其描述函数都有定义，有时也称为连续时间信号，用  $x(t)$  表示。离散信号如图 1-1b 所示，它的描述函数的定义域是某些离散点的集合，即其描述函数仅在规定的离散时刻有定义，有时也称为离散时间信号，用  $x(t_n)$  表示，其中  $t_n$  为某些特定时刻。图 1-1b 表示的是离散点在时间轴上均匀分布的情况，但也可以不均匀分布。均匀分布的离散信号可以表示为  $x(nT)$  或  $x(n)$ ，也可称为时间序列。

离散信号可以是连续信号的抽样信号，但不一定都是从连续信号采样得到的，有些信号确实只是在规定的离散时刻才有意义，例如人口的年平均出生率、纽约股票市场每天的道琼斯指数等。

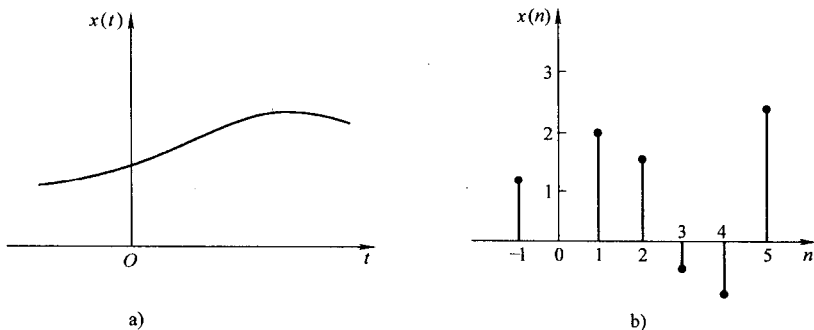


图 1-1 连续时间信号与离散时间信号

a) 连续时间信号 b) 离散时间信号

顺便指出，连续信号只强调时间坐标的连续，并不强调函数幅度取值的连续，因此，一个时间坐标连续、幅度经过量化（幅度经过近似处理只取有限个离散值）的信号仍然是连续信号，而那些时间和幅度均为连续取值的信号称为模拟信号。显然，模拟信号是连续信号，而连续信号不一定是模拟信号。同理，时间和幅度均为离散取值的信号称为数字信号，数字信号是离散信号，而离散信号不一定是数字信号。

### 3. 周期信号与非周期信号

周期信号是依时间周而复始的信号。

对于连续信号，若存在  $T > 0$ ，使

$$x(t) = x(t + nT) \quad n \text{ 为整数} \quad (1-1)$$

对于离散信号,若存在大于零的整数  $N$ ,使

$$x(n) = x(n + kN) \quad k \text{ 为整数} \quad (1-2)$$

则称  $x(t)$ 、 $x(n)$  为周期信号,  $T$  和  $N$  分别为  $x(t)$  和  $x(n)$  的周期。显然,知道了周期信号一个周期内的变化过程,就可以确定整个定义域的信号取值。

不具有周期的信号就是非周期信号,它们一定不满足式 (1-1) 或式 (1-2)。非周期信号也可以看作为周期是无穷大的周期信号,即在有限时间范围内其波形不重复出现。

#### 4. 能量信号和功率信号

如果从能量的观点来研究信号,可以把信号  $x(t)$  看作是加在单位电阻上的电流,则在时间  $-T < t < T$  内单位电阻所消耗的信号能量为

$$\int_{-T}^T |x(t)|^2 dt$$

其平均功率为

$$\frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt$$

信号的能量定义为在区间  $(-\infty, \infty)$  信号  $x(t)$  的能量,即

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

而信号的功率定义为在区间  $(-\infty, \infty)$  信号  $x(t)$  的平均功率,即

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |x(t)|^2 dt \quad (1-4)$$

若一个信号的能量  $E$  有界,则称其为能量有限信号,简称能量信号。根据式 (1-4),能量信号的平均功率为零。仅在有限时间区间不为零的信号是能量信号,如单个矩形脉冲信号等。客观存在的信号大多是持续时间有限的能量信号。

另一种情况,若一个信号的能量  $E$  无限,而平均功率  $P$  为不等于零的有限值,则称其为功率有限信号,简称功率信号。幅度有限的周期信号、随机信号等属于功率信号。

一个信号可以既不是能量信号,也不是功率信号,但不可能既是能量信号又是功率信号。

对于离散信号可以类似地得出定义和结论。

**例 1-1** 判断下列信号哪些属于能量信号,哪些属于功率信号。

$$x_1(t) = \begin{cases} A & 0 < t < 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$x_2(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta) \quad -\infty < t < \infty$$

$$x_3(t) = \begin{cases} t^{-1/4} & t \geq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

**解** 根据式 (1-3) 及式 (1-4),上述三个信号的  $E$ 、 $P$  分别可计算如下

$$E_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^1 A^2 dt = A^2 \quad P_1 = 0$$

$$E_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T A^2 \cos^2(\omega_0 t + \theta) dt = \infty \quad P_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A^2}{2T} \int_{-T}^T \cos^2(\omega_0 t + \theta) dt = \frac{A^2}{2}$$

$$E_3 = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_1^T t^{-1/2} dt = \infty \quad P_3 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_1^T t^{-1/2} dt = 0$$

因此,  $x_1(t)$  为能量信号;  $x_2(t)$  为功率信号;  $x_3(t)$  既非能量信号又非功率信号。

## 第二节 信号分析与处理概述

信号是信息的载体, 为了有效地获取信息以及利用信息, 必须对信号进行分析与处理。可以说, 对信息的利用程度在一定意义上取决于信号的分析与处理技术。

信号分析最直接的意义在于通过解析法或测试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。简言之, 就是从客观上认识信号。因而, 可以通过信号分析, 将一个复杂信号分解成若干简单信号分量之和, 或者用有限的一组参量去表示一个复杂波形的信号, 从这些分量的组成情况或这组有限的参量去考察信号的特性; 另一方面, 信号分析是获取信号源(主要指被研究的系统)特征信息的重要手段, 人们往往可以通过对信号特征的详细了解, 得到信号源特性、运行情况甚至故障等信息, 这正是故障分析和故障诊断的基础。

信号处理是指通过对信号的加工和变换, 把一种信号变换成另一种信号的过程。例如为了有效地利用信号中包含的有用信息, 采用一定的手段剔除原始信号中混杂的噪声, 削弱多余的内容, 这个过程就是最基本的信号处理过程。因此, 也可以把信号处理理解为为了特定的目的, 通过一定的手段改造信号。

信号的分析 and 处理是互相关联的两个方面, 它们的侧重面不同, 采取的手段也不同。但是, 它们又是密不可分的, 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, 通过对信号的一定加工和变换, 可以突出信号的特征, 便于有效地认识信号的特性, 从这一意义上说, 信号处理又可认为是信号分析的手段。但是, 认识信号也好, 改造信号也好, 共同的目的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。例如, 在通信领域如何实现可靠、经济和快速的信息传输交换, 在自动控制领域如何获取系统输出信号的最佳动态、静态性能。

信息时代的到来使信息科学渗透到社会活动、生产活动甚至日常生活的各个方面。作为信息科学的基础——信号分析与处理原理及技术已经广泛地应用于通信、自动控制、生物医学、遥感遥测、语言处理、图像处理、故障诊断、振动学、地震学、气象学等各个科学技术领域, 成为各门学科发展的技术基础和有力工具。

按对信号分析和处理方法的不同, 有模拟处理系统和数字处理系统两类。

模拟信号处理系统输入模拟信号, 通过模拟元件 RLC 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, 其基本形式如图 1-2 所示。人们常用的模拟滤波器是模拟信号处理系统最典型的例子。

数字信号处理是 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。图 1-3 表示了数字信号处理系统的基本结构。系统首先通过模—数转换(A/D)把原始模拟信号转换成数字信号, 当然, 如果原始信号是离散时间信号, 只要经过量化过程就能成为数字信号。数字系统是通用数字计算机或者专用数字硬件构成的系统, 它按预先给定

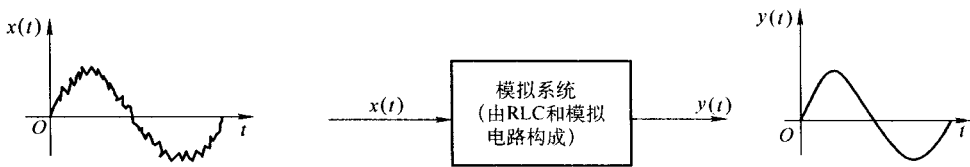


图 1-2 模拟信号处理系统框图

的处理程序对数字信号进行运算处理，处理结果是数字形式的。在一些情况下，这些数字结果就能满足处理的要求，直接可用。在另一些情况下，为了得到模拟输出，将数字输出经过数—模转换（D/A）即可。

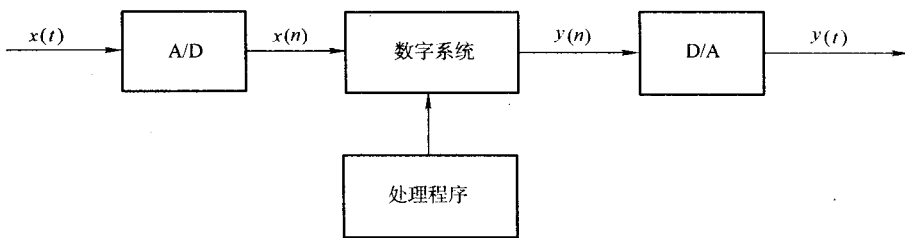


图 1-3 数字信号处理框图

数字信号处理系统以数学运算的形式对信号实现分析和处理，摒弃了传统的模拟电路处理信号的形式，因而具有处理功能强、精度高、灵活性大、稳定性好等突出优点，并且随着大规模集成电路技术的不断发展，处理的实时性不断得到提高。可以说，数字信号处理是信号处理的发展趋势，特别是一些复杂的信号处理任务更是如此。

微电子技术和计算机技术的发展为数字信号处理提供了必要的物质基础。但是，由于数字信号处理的核心是处理算法，因此，我们不能不提到库利（J.W.Cooley）和图基（J.W.Tukey）在 1965 年发明的一种快速傅里叶变换算法（FFT），它的出现，使数字信号处理的速度提高了几个数量级，真正开创了数字信号处理的新时代。随后，在大规模集成电路技术以及处理算法的进一步发展和推动下，数字信号处理得到了迅猛发展和广泛应用，各种专用器件和设备的不断涌现，特别是 20 世纪 80 年代推出了高速数字信号处理芯片（DSP），极大地提高了信号处理能力，并使设计开发工作简单易行，是数字信号处理技术发展的又一个里程碑。

### 第三节 自动控制系统中的信号分析与处理

自动控制系统是由相互关联、相互制约的若干个部分组成，为了达到某一控制目的具有一定功能的一个整体，它利用控制器使控制对象的物理量自动地按预定的规律变化。图 1-4 表示了一个典型的自动控制系统框图。其中  $r(t)$  为系统输入信号， $u(t)$  为控制信号， $y(t)$  为系统输出信号， $f(t)$  和  $e(t)$  分别称为反馈信号和偏差信号。一个自动控制系统，除了能量流和物质流以外，信息流起着关键的作用，通过各个组成部分的信号变换和作用，

才能实现系统的自动控制功能。可以认为,自动控制系统是一个将输入信号加工和变换为人们所期望的输出信号的设备,而自动控制系统的运行过程就是对信号的加工、变换过程。其中最重要的是控制器的作用,它把偏差信号变换为施加于控制对象的控制信号,这一变换过程的正确与否将直接影响自动控制系统的一系列重要特性,如稳定性、动态特性、静态特性等。自动控制系统的研究和设计,主要就是实现对控制器的设计和综合,就是在控制器上实现一定的控制策略,或者说实现一定的信号变换规则,例如常用的PID控制,是一种对偏差信号实现比例、积分、微分变换,并根据控制对象的性质进行加权综合的控制策略。

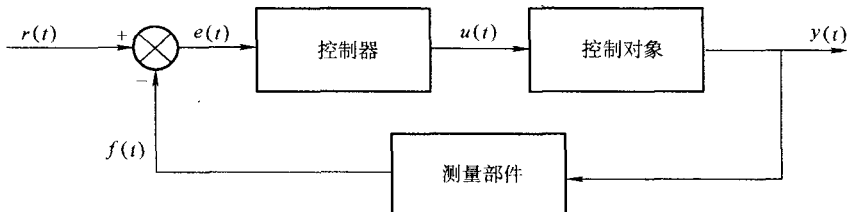


图 1-4 典型自动控制系统框图

在控制对象所处环境恶劣、干扰源多的情况下,往往需要在自动控制系统的某些位置设置滤波环节,以排除或削弱混杂在有用信号中的干扰噪声、测量噪声,这也是自动控制系统中必不可少的信号处理环节。

对于随机干扰严重的情况,系统受到外界杂散信号的作用,致使系统的状态的精确性受到很大影响,进而影响系统的最佳运行方式,这对于导弹、雷达跟踪系统等要求控制特性很高的系统显然是不能接受的,解决的办法是应用概率和数理统计的方法对系统的状态进行精确的估计,即所谓的状态估计,它是通过对系统输入信号和输出信号测量值的统计处理来实现的。

此外,对未知系统的建模,或者对于参数变化的控制对象的自适应控制,都需要通过对输入信号和输出信号的处理,建立系统的数学模型,或者确定变化了的控制对象的模型参数,这就是系统辨识,也可以归结为信号处理问题。

综上所述,自动控制和信号分析、处理是紧密相关的。随着自动控制系统对象和任务的更加复杂化,一些现代的更先进的信号处理理论和技术,如小波分析、智能化处理等也越来越地在自动控制中得到应用。因此,信号分析与处理是从事自动控制工程的科技人员必须掌握的基础理论之一。本书作为电气工程与自动化类专业学生的入门教材,由于课时和篇幅有限,仅介绍信号分析、处理理论和技术的最基本的概念、方法,使学生掌握自动控制技术中涉及的信号处理的基本理论和方法,并为进一步学习该领域的知识打下初步基础。

## 习 题

- 指出图 1-5 所示的各信号是连续时间信号还是离散时间信号。
- 判断下列各信号是否是周期信号?如果是周期信号,求出它的基波周期。
  - $x(t) = 2\cos(3t + \pi/4)$
  - $x(n) = \cos(8\pi n/7 + 2)$
  - $x(t) = e^{j(\pi - 1)t}$
  - $x(n) = e^{j(n/8 - \pi)}$
- $x(n) = \sum_{m=0}^{\infty} [\delta(n - 3m) - \delta(n - 1 - 3m)]$
- $x(t) = \cos 2\pi t \times u(t)$

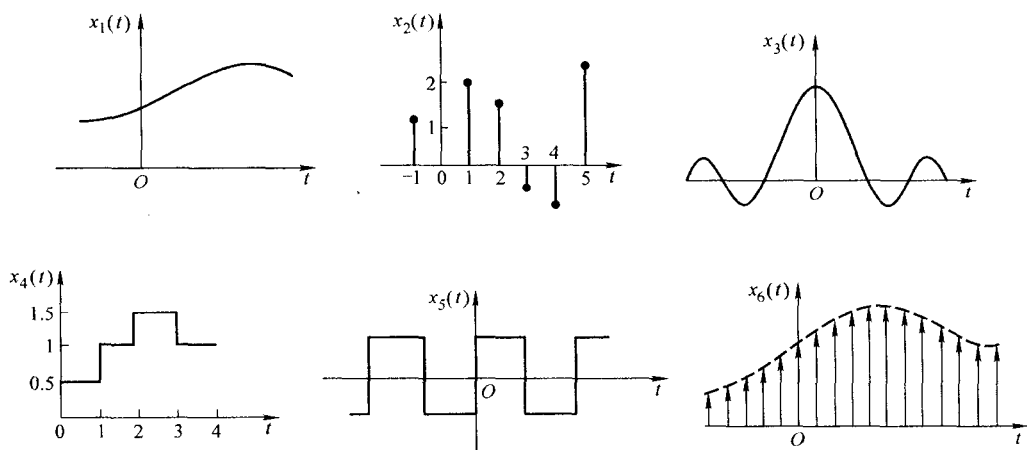


图 1-5 题 1 图

(7)  $x(n) = \cos(n/4)\cos(n\pi/4)$

(8)  $x(n) = 2\cos(n\pi/4) + \sin(n\pi/8) - 2\sin(n\pi/2 + \pi/6)$

3. 试判断下列信号是能量信号还是功率信号。

(1)  $x_1(t) = Ae^{-t} \quad t \geq 0$

(2)  $x_2(t) = A\cos(\omega_0 t + \theta)$

(3)  $x_3(t) = \sin 2t + \sin 2\pi t$

(4)  $x_4(t) = e^{-t}\sin 2t$

4. 对下列每一个信号求能量  $E$  和功率  $P$ : (其中  $u(t)$  和  $u(n)$  分别为单位阶跃信号和单位阶跃序列)

(1)  $x_1(t) = e^{-2t}u(t)$

(2)  $x_2(t) = e^{j(2t + \pi/4)}$

(3)  $x_3(t) = \cos t$

(4)  $x_1[n] = \left(\frac{1}{2}\right)^n u[n]$

(5)  $x_2[n] = e^{j[\pi/(2n) + \pi/8]}$

(6)  $x_3[n] = \cos\left(\frac{\pi}{4}n\right)$

## 第二章 连续信号的分析

连续的确定性信号是可用时域上连续的确定性函数描述的信号,是一类在描述、分析上最简单的信号,同时又是其它信号分析的基础。本章着重讨论这种信号的分析方法,包括时域分析、频域分析及复频域分析。

### 第一节 连续信号的时域描述和分析

通常一个信号是时间的函数,在时间领域内对其进行定量和定性的描述、分析是一种最基本的方法,这种方法比较直观、简便,物理概念强,易于理解。

#### 一、连续信号的时域描述

用一个时间函数或一条曲线来表示信号随时间而变化的特性称为连续信号的时域描述。在多种多样的连续确定性信号中,有一些信号可以用常见的基本函数表示,如正弦函数、指数函数、阶跃函数等,同时它们还可以组成许多更复杂的信号,我们把这类信号称为基本信号。讨论基本信号的时域描述有着重要的意义。通常基本信号可以分为普通信号和奇异信号两类,下面分别对它们进行描述。

##### (一) 普通信号的时域描述

##### 1. 正弦信号

一个正弦信号可表示为

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) = A \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad -\infty < t < \infty \quad (2-1)$$

式中,  $A$  为振幅;  $\omega$  为角频率 (rad/s);  $\varphi$  为初相位角 (rad)。如图 2-1 所示。

正弦信号是周期信号,其周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (2-2)$$

余弦信号与正弦信号只是在相位上相差  $\frac{\pi}{2}$  (见式 (2-1)), 所以通常也把它归属为正弦型信号。

正弦信号在实际中得到广泛应用,不仅仅因为它是典型信号,还在于它具有一系列对运算非常有用的性质:

1) 两个同频率的正弦信号相加,即使它们的振幅和初相位不同,

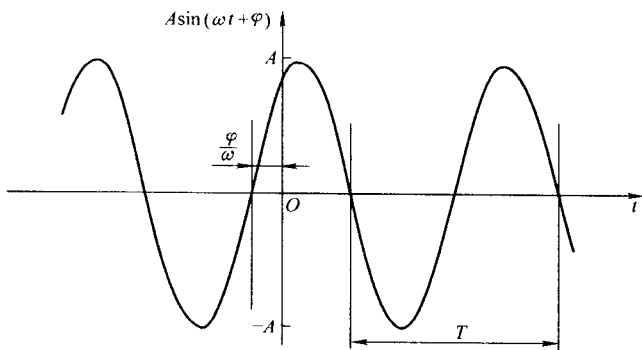


图 2-1 正弦信号

但相加的结果仍是原频率的正弦信号。

2) 如果一个正弦信号的频率  $f_1$  是另一个正弦信号频率  $f_0$  的整数倍, 即  $f_1 = nf_0$  ( $n$  为整数), 则其合成信号是频率为  $f_0$  的非正弦周期信号。把  $f_0$  称为该信号的基波频率,  $f_1$  称为  $n$  次谐波频率。据此, 我们可以把一个周期信号分解为基波信号和一系列谐波信号。

3) 正弦信号的微分和积分仍然是同频率的正弦信号。

## 2. 指数信号

一个指数信号可以表示为

$$x(t) = Ae^{st} \quad -\infty < t < \infty \quad (2-3)$$

式中,  $s = \sigma + j\omega$  为复数。

如果  $\sigma = 0, \omega = 0$ , 则  $x(t) = A$  即为直流信号。

如果  $\sigma \neq 0, \omega = 0$ , 则  $x(t) = Ae^{\sigma t}$ , 即为实指数信号, 其中  $\sigma < 0$  的情况表示了  $x(t)$  随时间按指数衰减,  $\sigma > 0$  的情况表示了  $x(t)$  随时间按指数增长, 信号的衰减或增长速度可以用实指数信号的时间常数  $\tau$  表示, 它是  $|\sigma|$  的倒数, 即  $\tau = 1/|\sigma|$ 。

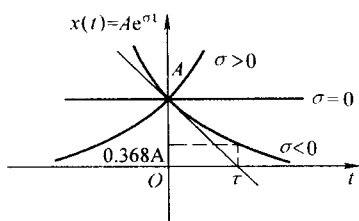


图 2-2 分别表示了直流信号和实指数信号。

如果  $\sigma \neq 0, \omega \neq 0$ , 则  $x(t) = Ae^{\sigma t} e^{j\omega t}$ , 即为复指数信号,  $s = \sigma + j\omega$  称为复指数信号的复频率。

按欧拉 (Euler) 公式, 复指数信号可以写成

$$x(t) = Ae^{st} = Ae^{\sigma t} e^{j\omega t} = Ae^{\sigma t} \cos\omega t + jAe^{\sigma t} \sin\omega t = \operatorname{Re}[x(t)] + j\operatorname{Im}[x(t)] \quad (2-4)$$

$x(t)$  可以分解为实部和虚部两个部分

$$\operatorname{Re}[x(t)] = Ae^{\sigma t} \cos\omega t \quad (2-5)$$

$$\operatorname{Im}[x(t)] = Ae^{\sigma t} \sin\omega t \quad (2-6)$$

分别为余弦和正弦信号,  $Ae^{\sigma t}$  反映了它们振荡幅度的变化情况, 即它们的包络线。图 2-3 表示了  $\sigma < 0$  时的  $\operatorname{Re}[x(t)]$  和  $\operatorname{Im}[x(t)]$ , 其中虚线为包络线  $Ae^{\sigma t}$ 。

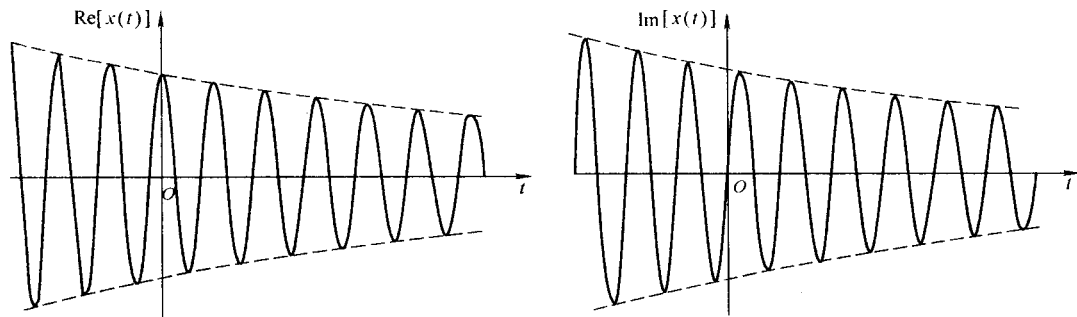


图 2-3 复指数信号 ( $\sigma < 0$ )

实际的信号总是实的, 即都是时间  $t$  的实函数, 复指数信号为复函数, 所以不可能实际产生。但是一方面如上所述, 它的实部和虚部表示了指数包络的正弦型振荡, 这本身具有一定的实际意义。其次, 它把直流信号、指数信号、正弦型信号以及具有包络线的正弦型信号



表示为统一的形式,并使信号的数学运算简练和方便,所以在信号分析理论中更具普遍意义。

在信号的数学运算中经常会用到如下式子:

$$e^{j\omega t} = \cos\omega t + j\sin\omega t \quad (2-7)$$

$$A\cos(\omega t + \varphi) = \frac{A}{2} [e^{j(\omega t + \varphi)} + e^{-j(\omega t + \varphi)}] = A\operatorname{Re}[e^{j(\omega t + \varphi)}] \quad (2-8)$$

$$A\sin(\omega t + \varphi) = \frac{A}{2j} [e^{j(\omega t + \varphi)} - e^{-j(\omega t + \varphi)}] = A\operatorname{Im}[e^{j(\omega t + \varphi)}] \quad (2-9)$$

**例 2-1** 已知两个信号分别为  $x_1(t) = 4\cos 100t - 6\sin 100t$  和  $x_2(t) = 5\cos\left(100t + \frac{\pi}{4}\right)$ , 求  $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ 。

**解** 由式 (2-8)、式 (2-9),  $x_1(t)$  可写为

$$x_1(t) = (2 + j3)e^{j100t} + (2 - j3)e^{-j100t}$$

同理  $x_2(t)$  可写为

$$\begin{aligned} x_2(t) &= 5\cos\left(100t + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{5}{2}(e^{j100t}e^{j\frac{\pi}{4}} + e^{-j100t}e^{-j\frac{\pi}{4}}) \\ &= (1.7678 + j1.7678)e^{j100t} + (1.7678 - j1.7678)e^{-j100t} \\ x(t) &= x_1(t) + x_2(t) = (3.7678 + j4.7678)e^{j100t} + (3.7678 - j4.7678)e^{-j100t} \\ &= 6.08e^{j51.7^\circ}e^{j100t} + 6.08e^{-j51.7^\circ}e^{-j100t} \\ &= 6.08(e^{j51.7^\circ + j100t} + e^{-(j51.7^\circ + j100t)}) \\ &= 12.15\cos(100t + 51.7^\circ) \end{aligned}$$

## (二) 奇异信号的描述

奇异信号是用奇异函数表示的一类特殊的连续时间信号,其函数本身或者函数的导数(包括高阶导数)具有不连续点。它们是从实际信号中抽象出来的典型信号,在信号的分析中占有重要的地位。

### 1. 单位斜坡信号

单位斜坡信号  $r(t)$  的定义为

$$r(t) = \begin{cases} t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2-10)$$

其波形如图 2-4 直线  $a$  所示,显然它的导数在  $t=0$  处不连续。图 2-4 直线  $b$  为  $r(t-t_0)$  的波形。

### 2. 单位阶跃信号

单位阶跃信号  $u(t)$  的定义为

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

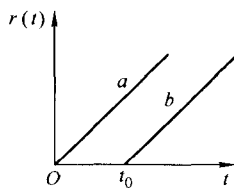


图 2-4 单位斜坡信号

没有定义  $t=0$  时的取值,因为在  $t=0$  处函数出现了跳变。如果必

要,则可以取  $u(t) \Big|_{t=0} = \frac{1}{2}$ , 即取其左、右极限的平均值。单位阶跃信号的波形如图 2-5 所示。