



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

信号分析与处理

华容 编著

1.6

武汉工业学院图书馆



01038197



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

信号分析与处理

X i n h a o F e n x i y u C h u l i

华 容 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书主要介绍信号分析与处理的基本理论、基本分析方法及基本实现方法。全书共6章,其内容包括:绪论、连续信号与系统分析、离散信号与系统分析、滤波器的设计、随机信号分析与处理、信号分析与处理的应用。

本书除介绍信号分析与处理的基本概念和原理外还着重介绍其应用实例。本书配备了一些实际应用的MATLAB例程,读者可通过形象、直观的计算机模拟与仿真实现加深对信号分析与处理的基本原理、方法及应用的理 解,从而能从基本理论过渡到实际应用。

本书构思新颖,实用性强,内容简明扼要,叙述深入浅出,并尽量体现工程背景,克服冗长的数学推导。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化及各种非电子信息类专业的本科生“信号分析与处理”课程教材,也可作为信号分析与处理方面的科技参考书。

图书在版编目(CIP)数据

信号分析与处理/华容编著. —北京:高等教育出版社,2010.8

ISBN 978-7-04-030662-0

I. ①信… II. ①华… 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(2010)第137438号

策划编辑 李 慧 责任编辑 魏 芳 封面设计 赵 阳 责任绘图 尹 莉
版式设计 范晓红 责任校对 姜国萍 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 肥城新华印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 16.25
字 数 390 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010年8月第1版
印 次 2010年8月第1次印刷
定 价 24.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30662-00

前 言

随着微电子与计算机技术的不断发展和广泛应用,电子技术已渗透到各个领域。信号分析与处理理论与技术作为一门新兴学科,已受到越来越多的关注。在高等学校中一些非电子信息类专业都已经开设了这方面的课程,但适用于应用型本科人才培养的教材几乎没有。

众所周知,当今是信息时代,在科研、生产和工程建设中,信号分析与处理技术,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。例如,电气系统和自动化系统都广泛地涉及信号分析与处理技术。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,系统测量噪声的去除,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与诊断,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,信号分析与处理技术对它的作用和影响还将越来越大。因此,作为一名电子信息与电气信息相关专业的学生,必须掌握信号分析与处理的原理和方法,了解和掌握它的应用技术。

当前,许多学校正在积极探索应用型人才培养的模式。为适应 21 世纪现代化、信息化生产对专业人才的要求,特别是高新技术产业的发展对人才的要求,急需对原有的课程进行必要的改革,调整内容,增加应用性新技术成果,以符合培养应用型人才的需要。

本教材重基础,强调应用性和实践性。在编写本书时,特别注意了以下几个方面:

观念更新——适应市场经济对高层次应用型人才的要求,加强学生工程实践能力和科技创新能力的训练,注重知识的应用。

内容更新——如较新的调制、解调和多路复用技术等,本教材尽可能反映实际应用内容,以适应当前自动化与控制工程人才的培养要求。

体系更新——在以往教材的基础上重构和重组,而非重建。进一步优化教材体系及内容,避免遗漏,并减少与“自动控制原理”课程内容的不必要的重复。

适用面广——本教材不仅适用于自动化类专业,还适用于非电子信息类各专业的教学。

本教材以变换为主干线,介绍基本概念、性质和应用举例。削枝强干,使重点突出、条理清楚;信号与系统相结合,连续信号与离散信号相结合;以计算机为辅助教学手段,本教材的例子和习题均采用 **MATLAB** 信号分析软件完成,使学生能完成数值计算,信号分析的可视化仿真调试,通过可视化调试结果使学生能实际动手设计、调试、分析,提高教学效果和学习效率,培养学生主动获取知识和独立解决问题的能力;既有基本理论分析又有应用性技术介绍。本教材特别增加第 6 章信号分析与处理的应用,以加强应用性实例介绍。

“信号分析与处理”作为一门技术基础课,以“电路”课程和“电子技术”课程为先修课,与“自动控制原理”课程有明确的分工。本教材主要讲述信号分析的一般概念与技术,如信号的时域分析、频域分析、傅里叶变换等;涉及系统理论方面,只介绍与本课程相关的概念,如系统函数、 z 变换等;在信号处理方面,本教材对“电子技术”中讲述过的各种信号处理电路不再叙述,对在

系统设计中占有重要地位的模拟滤波器和数字滤波器给予较多的阐述。另外,鉴于随机信号的分析与处理日趋重要,本教材对此做了适当的介绍,以便为学生建立初步的概念。

在有限的学时内要让学生对信号理论有较全面的了解,同时使学生学以致用,这是本书编写的指导思想。编者力求避免课程内容的重复,对本书必不可少的系统知识只做简单介绍,所占篇幅不多,授课者可根据学习对象进行取舍。

参加本书编写工作的有上海应用技术学院华容、沈希忠,第4章由沈希忠编写,其余各章由华容编写,华容负责全书的统稿工作。合肥工业大学徐科军教授在百忙之中对全书进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2010年2月于上海应用技术学院



说明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真：(010)82086060

E-mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118



目 录

第 1 章 绪 论	1	2.4.3 用 MATLAB 实现连续时间信号的 卷积	60
1.1 信号及其分类	1	2.4.4 用 MATLAB 实现连续时间信号的 频域分析	61
1.1.1 连续时间信号与离散时间信号	1	2.4.5 用 MATLAB 求 LTI 连续系统的 响应	65
1.1.2 确定信号与随机信号	1	习题	68
1.1.3 周期信号与非周期信号	2	第 3 章 离散信号与系统分析	75
1.1.4 能量信号与功率信号	2	3.1 信号的离散化与采样定理	75
1.1.5 奇异信号	3	3.1.1 信号的采样过程及其频谱分析	75
1.2 信号分析与处理概述	3	3.1.2 采样定理	77
1.2.1 模拟信号处理	4	3.2 离散信号的时域分析	80
1.2.2 数字信号处理	4	3.2.1 常见的离散信号	80
1.2.3 典型自动控制系统	5	3.2.2 离散信号的分类	82
1.3 系统及其分类	6	3.2.3 离散时间信号的运算	83
1.3.1 系统的描述	6	3.3 离散信号的频域分析	88
1.3.2 系统的性质	7	3.3.1 离散时间序列的傅里叶 变换(DTFT)	88
1.3.3 系统的分类	8	3.3.2 傅里叶变换的离散性与周期性	91
习题	11	3.3.3 从离散傅里叶级数到离散傅里叶 变换	94
第 2 章 连续信号与系统分析	13	3.3.4 离散傅里叶变换的性质	100
2.1 连续信号的时域描述与分析	13	3.3.5 快速傅里叶变换(FFT)简述	108
2.1.1 连续信号的时域描述	13	3.4 离散信号的 z 域分析	110
2.1.2 连续信号的时域基本运算	17	3.4.1 z 变换	110
2.1.3 信号的时域分解	20	3.4.2 z 变换的基本性质和定理	114
2.2 连续信号的频域分析与性质	25	3.4.3 逆 z 变换的方法	115
2.2.1 连续周期信号的频谱分析 ——傅里叶级数	25	3.5 离散时间系统分析	120
2.2.2 连续非周期信号的频谱分析 ——傅里叶变换	30	3.5.1 离散时间系统的时域分析	120
2.2.3 傅里叶变换的基本性质及应用	39	3.5.2 离散系统的频域分析	124
2.2.4 能量谱与功率谱	46	3.6 离散信号与系统分析的仿真	125
2.3 连续时间系统分析	48	3.6.1 生成波形数据	125
2.3.1 连续时间系统的时域分析	48	3.6.2 数据存储	129
2.3.2 连续时间系统的频域分析	55	3.6.3 FFT 的 MATLAB 实现	130
2.4 连续信号与系统分析的仿真	57		
2.4.1 连续信号的时域运算及时域变换	57		
2.4.2 用 MATLAB 分析时间信号	59		

3.6.4 利用 MATLAB 求 LTI 离散系统的 响应	133	5.2 典型随机信号	193
习题	134	5.2.1 高斯信号	193
第 4 章 滤波器的设计	136	5.2.2 白噪声	197
4.1 滤波器概述	136	5.3 随机信号的频域分析	198
4.2 数字滤波器的幅频特性	137	5.3.1 功率谱密度函数	198
4.2.1 理想滤波器的幅频特性	137	5.3.2 随机信号功率谱密度及自相关函数的 关系	199
4.2.2 实际滤波器的幅频特性	138	5.4 随机信号通过线性系统的分析	202
4.2.3 理想滤波器的频率响应	139	5.4.1 时域分析	202
4.2.4 传递函数	142	5.4.2 域频分析	203
4.3 无限冲激响应(IIR)数字滤波器的 设计	145	5.5 随机信号分析与处理的仿真	206
4.3.1 概述	145	习题	209
4.3.2 无限冲激响应(IIR)数字滤波器的 设计方法	148	第 6 章 信号分析与处理的应用	211
4.3.3 模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	150	6.1 调制和解调	211
4.4 FIR 数字滤波器的设计	158	6.1.1 正弦幅度调制和相干解调	211
4.4.1 FIR 滤波器的传递函数	158	6.1.2 调幅和检波	213
4.4.2 FIR 滤波器的频率响应和相位 响应	158	6.1.3 单边带调制	216
4.4.3 FIR 数字滤波器的窗口设计法	161	6.2 脉冲幅度调制和脉冲编码调制	219
4.4.4 频率采样法	164	6.2.1 脉冲幅度调制	219
4.5 滤波器设计的仿真	165	6.2.2 脉冲编码调制	224
4.5.1 利用 MATLAB 设计 IIR 滤波器	165	6.3 多路复用	225
4.5.2 利用 MATLAB 设计 FIR 滤波器	168	6.3.1 频分多路复用和时分多路复用	226
习题	170	6.3.2 正交多路复用和码分多路复用	229
第 5 章 随机信号分析与处理	172	6.4 信号处理在离散时间系统中的 应用	233
5.1 随机信号的描述	172	6.4.1 噪声的降低	233
5.1.1 随机信号的基本概念	172	6.4.2 回声与混响	235
5.1.2 随机信号的幅度分析	174	6.5 傅里叶变换在工程中的应用	236
5.1.3 随机信号在时域的数字特征	175	6.5.1 电机转速的测量	236
5.1.4 平稳过程	182	6.5.2 发动机缺缸故障检测	238
5.1.5 遍历性随机信号	190	6.5.3 单相电路谐波电流的实时检测	240
		附录 MATLAB 信号工具箱的使用	245
		参考书目	251

第1章 绪 论

1.1 信号及其分类

信号概念广泛地出现在各个领域,它以各种各样的表现形式携带着特定的信息。古战场曾以击鼓鸣金传达前进或撤退的命令,更以烽火作为信号传递敌人进犯的紧急情况。近代,信号的利用更是涉及力、热、声、光、电等诸多方面。信号可以定义为承载相关物理系统状态或特性信息的函数。通常把语言、文字、图像或数据等统称为消息,信号是消息的表现形式或运载工具,即消息蕴涵于信号之中。与信号密切相关的更广义的概念是信息,一般而言,信息是指从客观世界获得的新知识或者对客观事物发出的新要求,它是变化的,不可预知的。信息的传递、变换、储存和提取是借助信号完成的。信号的具体形式是某种物理量,如光信号、电信号、声音信号等。所谓电信号通常是指随时间变化的电压和电流,也可以是电荷或磁通以及电磁波等,电信号是应用最广的信号形式。

信号一般可表示为一个或多个变量的函数。例如,锅炉的温度可表示为温度随时间变化的函数;语音信号可表示为声压随时间变化的函数;一张黑白图片能表示为灰度随二维空间变量变化的函数。根据信号随时间变化的特点,可将信号分为下列类型。

1.1.1 连续时间信号与离散时间信号

对连续时间定义域内的任意值(除若干不连续点之外),都可以给出确定的函数值,该信号称为连续时间信号,简称连续信号(Continuous Signal),通常用 $f(t)$ 或 $x(t)$ 表示。幅值是连续的连续信号,又称为模拟信号(Analog Signal),连续信号的幅值也可以是离散的。例如,图1.1.1(a)与(b)分别表示一个模拟信号和一个具有离散幅值的连续信号。离散时间信号的时间定义域是离散的,并简称为离散信号,它只在某些不连续的指定时刻具有函数值。一般情况下,离散信号取均匀时间间隔,其定义域成为一个整数集。数字信号(Digital Signal)属于离散信号,但其幅值则被限定为某些离散值。离散信号用 $f(n)$ 的形式表示,式中 n 为整数,表示序号,因此离散信号也称为序列。图1.1.2描绘的都是离散信号,其中图1.1.2(b)为数字信号。

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,数字信号是离散信号,而离散信号不一定是数字信号。

1.1.2 确定信号与随机信号

可用明确的数学关系式描述的信号称为确定信号,它可分为周期信号和非周期信号。例如,正弦信号、指数信号、阶跃信号以及准周期信号和瞬变非周期信号等。不能用明确的数学关系式描述的信号,也就是不可预知的信号称为随机信号,随机信号只能用概率统计的方法描述。

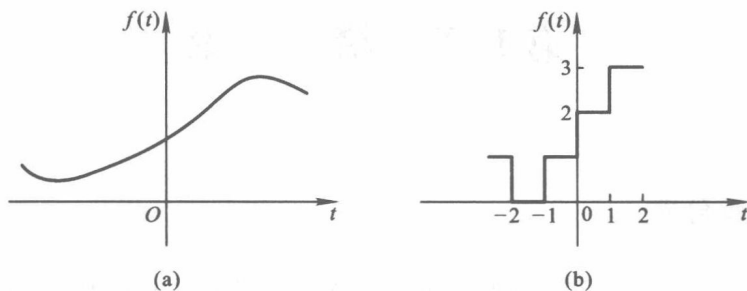


图 1.1.1 连续时间信号

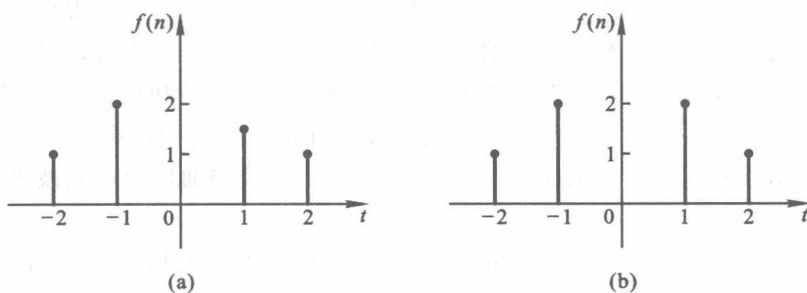


图 1.1.2 离散时间信号

要指出的是,如果通信系统中传输的信号都是确定信号,接收者就不可能由它获得新的信息。因此,随机信号在信号分析与处理中占有十分重要的地位。

1.1.3 周期信号与非周期信号

周而复始、且无始无终的信号称为周期信号(Periodic Signal)。设周期(Period)为 T , $f(t)$ 表示某一周期函数,则周期信号可表示为

$$f(t) = f(t+nT), \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1.1)$$

非周期信号不具有周期信号的特点。例如,指数信号就是瞬变非周期信号。

信号理论中的“无始”意味时间是从 $t = -\infty$ 开始的,而“无终”则意味截止时间是 $t = +\infty$ 。

1.1.4 能量信号与功率信号

可以从能量的观点来研究信号,如把信号 $f(t)$ 看作为加在 1Ω 电阻上的电流,则在时间间隔 $-T \leq t \leq T$ 内所消耗的能量为

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1.1.2)$$

其平均功率为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1.1.3)$$

若信号函数平方可积,则 W 为有限值,称为能量有限信号,简称能量信号(Energy Signal)。根据式(1.1.3),能量信号的平均功率为零。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,若信号 $f(t)$ 的 W 趋于无穷(相当于 $1\ \Omega$ 电阻消耗的能量),而 P (相当于平均功率)为不等于零的有限值,则称为功率信号(Power Signal)。一个幅度有限的周期信号或随机信号能量无限,但功率有限,则为功率信号。

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,可以得出类似的定义和结论。

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。

$$f_1(t) = \begin{cases} A, & 0 < t < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$f_2(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta), \quad -\infty < t < \infty$$

$$f_3(t) = \begin{cases} t^{-\frac{1}{4}}, & t \geq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

解 根据式(1.1.2)及式(1.1.3),上述三个信号的 W 、 P 分别可计算为

$$W_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^1 A^2 dt = A^2, \quad P_1 = 0$$

$$W_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T A^2 \cos^2(\omega_0 t + \theta) dt = \infty$$

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

$$W_3 = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_1^T t^{-\frac{1}{2}} dt = \infty, \quad P_3 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_1^T t^{-\frac{1}{2}} dt = 0$$

式中, $f_1(t)$ 为能量信号; $f_2(t)$ 为功率信号; $f_3(t)$ 既非能量信号又非功率信号。

1.1.5 奇异信号

如果信号函数本身具有不连续点,或者其导数与积分有不连续点,则称之为奇异信号。实际信号可能比较复杂,可通过某种条件加以理想化,用一些简单的典型信号表示。冲激信号与阶跃信号就是两种典型的奇异信号。

1.2 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。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。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波形复杂的信号,从分量的组成情况或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,这也是故障分析和故障诊断的基础。

信号处理是一个通过对信号的加工和变换把一个信号变换成另一个信号的过程。例如,采用一定的手段去除原始信号中混杂噪声的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的过程。

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,共同的目的都是为了充分地从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。

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、气象学等各种科学技术领域,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两类。

1.2.1 模拟信号处理

模拟信号处理系统输入模拟信号,通过由模拟元件及模拟电路构成的模拟系统加以处理,输出的仍然是模拟信号,其系统框图如图 1.2.1 所示。常用的模拟滤波器是模拟信号处理系统最典型的例子。

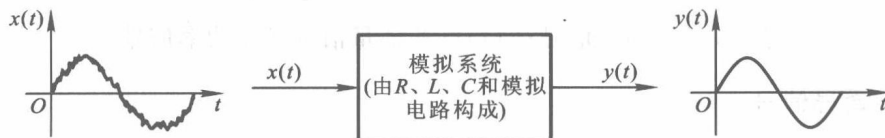


图 1.2.1 模拟信号处理系统框图

1.2.2 数字信号处理

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 1.2.2 所示为数字信号处理系统框图,系统首先通过模数(A/D)转换对连续时间信号离散化并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,它按给定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分析的要求,直接可用。在另一些情况下,可将数字输出经过数模(D/A)转换得到模拟输出。

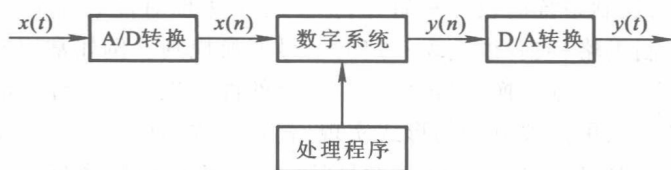


图 1.2.2 数字信号处理系统框图

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,摒弃了传统的模拟处理的形式,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,随着大规模集成电路技术的不断发展,处理的实时性也不断得到提高。可以说,数字信号处理是信号处理的主要内容,对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。由于数字信号处理的核心是处理算法,因此,不能不提到库利(J. W. Cooley)和图基(J. W. Tukey)在 1965 年提出的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 年代推出了数字信号处理器芯片(DSP),极大地提高了信号实时处理能力,是数字信号处理技术发展的又一个里程碑。

1.2.3 典型自动控制系统

自动控制系统是由相互制约的若干部分组成,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 1.2.3 所示为一个典型的自动控制系统框图。其中 $r(t)$ 为系统输入变量, $u(t)$ 为控制变量, $y(t)$ 为系统输出变量, $f(t)$ 和 $e(t)$ 分别称为反馈变量和偏差变量。



图 1.2.3 典型自动控制系统框图

一个系统要实现自动控制,除了能量流和物质流以外,信息流起着关键的作用,通过各个组成环节的信号变换和作用,才能实现系统的自动控制功能。可以认为,自动控制系统就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。自动控制系统的设计和研究,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规则。当然,控制器的信号加工变换可以用模拟电路的形式实现,就是常称的模拟控制系统;也可以由数字计算机实现(必须通过A/D、D/A和外界连接),就是常称的计算机控制系统。

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计滤波环节,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,同样,可采用模拟滤波形式或者数字滤波形式。

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,这也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。随着自动控制系统的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。

1.3 系统及其分类

信号和系统是信号处理的两个因素,信号是信号处理的对象,系统是信号处理的工具,信号处理的方法很多,处理信号的各种系统也是数不胜数。

在信息学科领域,系统是为了实现信息可靠和有效地传输、变换而对信号进行必要的加工、处理、变换的设备的总称。信号的处理、变换过程是由系统完成的,要了解信号处理的内容及实质,首先必须对系统及其特性加以了解。

1.3.1 系统的描述

系统一般可定义为由若干个互相依赖的事物组成的具有特定功能的整体。例如太阳系、人的神经系统、原子结构等属于自然系统;交通运输网、大型计算机等属于人工系统;社会经济、政治机构等属于非物理系统;机械传动系统,通信网、电力网等属于物理系统。因此系统是一个并不陌生的、应用非常广泛的概念。系统可以处理模拟信号或数字信号。系统的状态指的是各个变量,例如电容器的电压和电感器的电流,它们都可以用来表示系统的变量。初始状态由这些变量的初始值或初始条件来描述,若初始条件为零,则该系统就是松弛的。凡是具有信息加工和交换的场所都是系统存在的地方。系统可以小到一个细胞,甚至基本粒子,也可以复杂到诸如人体、全球通信网,乃至整个宇宙,它们可以是自然的,也可以是人为的。

在信号分析与处理领域中所研究的系统一般不是指应用中的一个具体系统,而是一个如图 1.3.1 所示的抽象系统。它将外部对系统的作用抽象为可用数学函数表示的输入信号(或称为激励),将具体的实际系统本身抽象为用数学方程或函数描述的数学模型,系统因外部作用或内部因素而引起的变化或产生的结果则体现在输出信号(或称为响应)之中。因此,在这样一个分析和研究模式下的系统是一个和信号密切相关的、用数学方法描述的抽象系统。

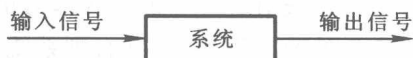


图 1.3.1 抽象系统

下面用太阳能取暖房系统的例子来说明系统的描述。

太阳能取暖房系统是这样运行的:太阳加热了太阳能面板中的空气,面板由透明管道组成。热空气通过鼓风机进入热存储器,它是一个充满了细砾的箱子,以后热能被送入房间。现在要研究的是太阳的烈度和鼓风机速度如何影响存储器的温度。该系统可用图 1.3.2 表示。

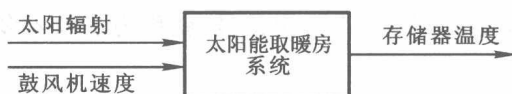


图 1.3.2 太阳取暖房系统

1.3.2 系统的性质

下面讨论系统的性质,这些性质具有重要的物理意义。

1. 线性

同时满足叠加性和齐次性的系统称为线性系统,否则,该系统为非线性。

所谓叠加性是指几个输入信号同时作用于系统时,系统的响应等于每个输入信号单独作用所产生的响应之和,即若 $x_1(t) \rightarrow y_1(t)$, $x_2(t) \rightarrow y_2(t)$, 则 $x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$ 。

所谓齐次性是指当输入信号为原输入信号的 k 倍时,系统的输出响应也为原输出响应的 k 倍,即若 $x(t) \rightarrow y(t)$, 则 $kx(t) \rightarrow ky(t)$ 。

叠加性和齐次性合在一起称为线性条件。综合上面的条件,一个线性系统应满足

$$ax_1(t) + bx_2(t) \rightarrow ay_1(t) + by_2(t) \quad (1.3.1)$$

2. 记忆性

对于任意的输入信号,如果每一时刻系统的输出信号值仅仅取决于该时刻的输入信号值,而与别的时刻值无关,称该系统具有无记忆性,否则,该系统为有记忆性。

3. 因果性

对于任意的输入信号,如果系统在任何时刻的输出值,只取决于该时刻和该时刻以前的输入值,而与将来时刻的输入值无关,就称该系统具有因果性,否则,如果某个时刻的输出值还与将来时刻的输入值有关,则为非因果的。

4. 可逆性

如果一个系统对不同的输入信号产生不同的输出信号,即系统的输入、输出信号成一一对应的关系,则称该系统具有可逆性,否则就是不可逆的。

5. 稳定性

稳定性是系统的一个十分重要的特性,一个稳定的系统才是有意义的。在信号处理中,一个直观、简单的稳定性定义是:如果一个系统对其有界的输入信号的响应也是有界的,则该系统具有稳定性,否则,如果对有界输入产生的输出不是有界的,则系统是不稳定的。关于一个系统的稳定性判别方法请读者参阅有关资料。

1.3.3 系统的分类

可以从不同的角度对系统进行分类。研究系统时,根据其数学模型所描述的差异,可以分为连续时间系统和离散时间系统。连续时间系统通常用微分方程或连续时间状态方程描述,而离散时间系统通常用差分方程或离散时间状态方程描述。此外,还有单输入单输出系统和多输入多输出系统之分。如果系统只有一个输入信号,也只有一个输出信号,则为单输入单输出系统;如果一个系统有多个输入信号和(或)多个输出信号,就称为多输入多输出系统。下面从系统的性质进行分类。

1. 线性系统与非线性系统

同时满足叠加性和齐次性的系统称为线性系统,否则称为非线性系统。图 1.3.3 所示为线性与非线性的关系。

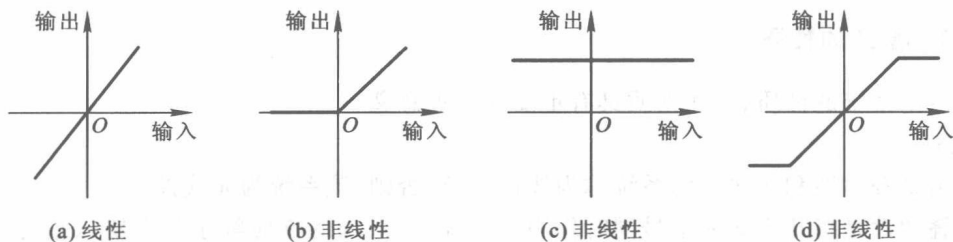


图 1.3.3 线性与非线性的关系

2. 时不变系统与时变系统

时不变(也可称为移不变)意味着响应 $y(t)$ 的形状只依赖于输入 $x(t)$ 的形状,而不依赖于 $x(t)$ 的输入时间。如果将输入平移到 $x(t-a)$,那么响应也等量地平移了,变为 $y(t-a)$ 。换言之,系统不会随着时间的改变而改变。这样的系统称为时不变系统,否则就是时变系统。在时变系统中,至少有一个系统元件是时间的函数,从而使系统表达式包含随时间而变的系数。

检验一个系统的时不变性的方法是:对于 $x_1(t)$,有 $y_1(t)$,令 $x_2(t) = x_1(t-t_0)$,检验 $y_2(t)$ 是否等于 $y_1(t-t_0)$,若是,这系统是时不变的;否则,系统是时变的。

例 1.2 判断系统 $y(t) = tx(t)$ 是否是线性系统与时不变系统。

解

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t) = tx_1(t)$$

$$x_2(t) \rightarrow y_2(t) = tx_2(t)$$

令 $x_3(t) = ax_1(t) + bx_2(t)$ a, b 为任意常数

$$y_3(t) = tx_3(t) = t[ax_1(t) + bx_2(t)] = atx_1(t) + btx_2(t) = ay_1(t) + by_2(t)$$

故系统是线性系统。

因为 $y_1(t) = tx_1(t), y_1(t-t_0) = (t-t_0)x_1(t-t_0)$

但当 $x_2(t) = x_1(t-t_0)$ 时, 有

$$y_2(t) = tx_2(t) = tx_1(t-t_0) \neq y_1(t-t_0)$$

故系统是时变系统。

例 1.3 判断系统 $y(t) = x(t)x(t-1)$ 是否为线性系统与时不变系统。

解 $x_1(t) \rightarrow y_1(t) = x_1(t)x_1(t-1)$

$$x_2(t) \rightarrow y_2(t) = x_2(t)x_2(t-1)$$

令 $x_3(t) = ax_1(t) + bx_2(t)$ a, b 为任意常数

$$\begin{aligned} y_3(t) &= x_3(t)x_3(t-1) = [ax_1(t) + bx_2(t)][ax_1(t-1) + bx_2(t-1)] \\ &= a^2x_1(t)x_1(t-1) + b^2x_2(t)x_2(t-1) + abx_1(t)x_2(t-1) + abx_1(t-1)x_2(t) \\ &\neq ay_1(t) + by_2(t) \end{aligned}$$

所以系统为非线性系统。

因为 $y_1(t) = x_1(t)x_1(t-1), y_1(t-t_0) = x_1(t-t_0)x_1(t-t_0-1)$

令 $x_2(t) = x_1(t-t_0)$

有 $y_2(t) = x_2(t)x_2(t-1) = x_1(t-t_0)x_1(t-t_0-1) = y_1(t-t_0)$

所以系统是时不变系统。

3. 瞬时系统和动态系统

无记忆性的系统称为无记忆系统或瞬时系统, 有记忆的系统称为记忆系统或动态系统。

一个电阻器是一个最简单的无记忆系统, 因为电阻器两端某时刻的电压值 $y(t)$ 完全由该时刻流过电阻 R 的电流 $x(t)$ 决定, 即

$$y(t) = Rx(t) \quad (1.3.2)$$

同理, 数乘器、加法器、相乘器都是无记忆系统, 无记忆系统通常由代数方程描述。

含有储能单元的系统是一种动态系统, 这种系统即使在输入信号去掉后, 仍能产生输出, 因为它所含的储能元件记忆着系统以前的状态, 记忆着输入信号曾经有过的影响。例如一个电容器 C 是一个动态系统, 它两端的电压 $y(t)$ 与流过它的电流 $x(t)$ 具有关系式

$$y(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \quad (1.3.3)$$

即系统在 t 时刻的输出是 t 时刻以前的积累。动态系统通常可用微分方程或差分方程描述。此外, 含有延迟单元 $y(t) = x(t-t_0)$ 的系统是连续时间动态系统, 因为系统在 t 时刻的输出总是由该时刻以前的 $(t-t_0)$ 时刻的输入决定, 说明该系统具有记忆以前输入的能力, 同理, $y(n) = y(n-1)$ 是离散时间动态系统。

4. 因果系统和非因果系统

具有因果性的系统称为因果系统, 具有非因果性的系统称为非因果系统。