



陈行禄 秦永元 编著

信号分析与处理



北京航空航天大学出版社

73.412
608
1

DG57/15

信号分析与处理

陈行禄 秦永元 编著

北京航空航天大学出版社

1015093

(京)新登字166号

内 容 简 介

本书以谱分析和滤波为重点内容,既包括模拟信号分析与处理,也包括数字信号分析与处理,并以后者为重点,前者为基础。另外还提供了 Z 变换、离散系统分析等数字信号处理所需的理论基础知识。在重视基本理论概念的同时,也注意这些理论方法的应用及设计实现。本书特点是:少而精,系统性强,注意循序渐进,减少学习台阶,推导详细,注重数学公式的物理概念的解释,方便理解和自学。

本书可作为自动控制工程类测试、控制、电气技术等专业大学本科的教科书,亦可作为从事各种机电类专业的工程技术人员学习信号处理的自学入门参考书。

信号分析与处理

XINHAO FENXI YU CHULI

编著者 陈行禄 秦永元

责任编辑 肖之中

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

通县觅子店印刷厂印装

850×1168 1/32 印张:14.5 字数:389千字

1993年7月第一版 1993年7月第一次印刷 印数:4000册

ISBN 7-81012-374-2/TP·084 定价:4.45元

前 言

本教材是按照航空高等院校第一教材委员会自动控制工程专业委员会1991~1992年教材选题规划中规定的大纲编写。参考学时为50~70。

当前数字信号处理技术已广泛地应用于各种科学技术领域,诸如语音处理、图象处理、遥感技术、雷达技术、数据通信、声纳工程、自动控制工程、生物医学、振动学、地震学等等,不胜枚举。它为各门技术科学的发展提供了一个有力的工具。作为从事自动控制工程的科技工作者也迫切需要掌握它的有关理论与技术,以适应当前科学技术飞速发展的形势,为此需要编写一本适合于他们的教材。

近年来,国内外陆续出版了不少有关数字信号处理方面的教材,但它们大多适合于电子通讯工程类的专业教学,要求学过“信号与系统”、“网络综合”等前修课程。对于属于机电类的自动控制工程专业类的学生来说,他们虽有一定线性控制系统的基础知识,但一般都未学过上述这些前修课,因此信号分析与信号处理的基础很薄弱甚至没有,因而这类教材对他们来说,学习时显得台阶较高。本教材充分考虑了这个特点,特别为他们提供了模拟信号分析与模拟滤波等必要的信号理论方面的基础知识,为顺利学习数字信号处理铺平道路。几年来的教学实践表明,这样循序渐进的做法对于机电类自动控制工程专业的学生来说是恰当的,这也是本教材的名称没有冠以“数字信号处理”而是以“信号分析与处理”来命名的缘由。也就是说,它既包含了模拟信号分析与处理的内容,也包含了数字信号处理方面的内容,并以后者为重点,而以前者为基础。

1015093

本书另一特点是力求写成一本简明扼要的导论性基础理论著作。由于信号处理内容十分丰富,而教学时数与教材篇幅又很有限,故提供这样一本教材是适当的。因此本教材在内容上以谱分析与滤波这两个信号处理的基本内容作为全书的重点,并以一维确定性信号为主而对随机信号只作了简单介绍,二维的则未涉及。在基本内容方面也不追求面上的扩展和深入,而是力求少而精地讲清基本理论概念和方法,先解决好入门问题,为今后面上的扩展和深入准备好基础。关于教材内容的具体安排详见绪论。

由于信号处理的理论性较强,数学运算推导较多,使部分学生感到不易掌握。因此本教材注意联系实际提出问题,讲清推导思路,避免只给结论不作证明的作法,特别注意数学算式的物理意义的说明,使学生便于理解和掌握。在讲清基本理论概念的同时,本教材也为实际运用信号分析方法和设计信号处理设备提供了必要的基本知识和设计举例。教材中还精选了一部分习题,这些习题大都运算不太复杂,而着重于巩固基本理论和概念。在教学条件许可时,最好能再安排一些较大型的综合性作业,如利用FFT作谱分析、数字滤波器设计及实现等,以培养运用数字信号处理的实践能力。

数字信号处理技术的重要性已日渐为人们所认识。各种科技领域中的工程技术人员都对它感到兴趣。其中有不少是从事机电类或机械类专业的,他们过去对数字信号处理的理论了解较少,而又希望能在较短的时间内进入这一领域。本教材希望也能助他们一臂之力。

本书由北京航空航天大学陈行禄担任主编。书中第五、六、九章由西北工业大学秦永元执笔,其余各章由陈行禄执笔。

本书初稿承中国科学院学部委员、清华大学李衍达教授审阅,并提出了许多宝贵意见和建议,在此谨表衷心的感谢。作者还要感谢航空工业部教材编审室杨心灿同志以及航空高校教材委员会负责本书的责任委员魏鸿然同志。他们都为本书的出版付出

了辛勤的劳动。

编者水平有限，缺点 错误在所难免，敬 请读者 不吝指正。

编 者

1991. 11

目 录

绪 论

- 0.1 信号的定义与分类····· (1)
- 0.2 信号分析与处理技术的应用与发展····· (4)
- 0.3 本书宗旨及内容安排····· (12)

第一章 连续时间信号分析

- 1.1 冲激函数与卷积····· (14)
- 1.2 周期信号的频谱分析——傅里叶级数····· (26)
- 1.3 非周期信号的频谱分析——傅里叶变换····· (43)
- 1.4 抽样信号的傅里叶变换····· (77)
- 习题····· (88)

第二章 序列及其 Z 变换

- 2.1 离散时间信号——序列····· (94)
- 2.2 序列的 Z 变换····· (99)
- 2.3 Z 反变换····· (111)
- 2.4 Z 变换的性质和定理····· (113)
- 习题····· (129)

第三章 离散时间系统基础

- 3.1 线性非移变离散系统及其数学模型····· (132)
- 3.2 离散系统的时域分析····· (136)
- 3.3 离散系统的 Z 域分析····· (147)
- 习题····· (164)

第四章 离散时间信号分析

- 4.1 序列的傅里叶变换····· (167)
- 4.2 信号的傅氏变换、拉氏变换与 Z 变换的关系····· (171)
- 4.3 离散傅里叶级数 (DFS) ····· (176)

4.4	离散傅里叶变换 (DFT)	(183)
4.5	DFT的性质	(189)
4.6	频率抽样理论	(201)
	习题	(207)

第五章 快速傅里叶变换 (FFT)

5.1	根据定义计算DFT时存在的问题	(211)
5.2	基2时析型FFT	(212)
5.3	基2频析型FFT	(226)
5.4	FFT子程序的一些特殊应用	(232)
	习题	(235)

第六章 离散傅里叶变换的应用

6.1	利用DFT逼近连续时间信号的频谱	(238)
6.2	加窗的作用和常用窗函数	(243)
6.3	频谱细化技术	(247)
6.4	利用FFT计算卷积	(254)
	习题	(262)

第七章 模拟滤波器

7.1	基本概念	(265)
7.2	传递函数设计的一般方法	(274)
7.3	巴特沃思滤波器	(278)
7.4	切比雪夫滤波器	(286)
7.5	频率变换	(293)
	习题	(304)

第八章 数字滤波器

8.1	基本概念	(306)
8.2	IIR数字滤波器设计	(315)
8.3	FIR数字滤波器设计	(344)
8.4	数字滤波器的实现	(370)
	习题	(405)

第九章 随机信号分析

9.1	随机信号的描述	(411)
-----	---------------	---------

9.2 线性系统对随机信号的响应.....	(421)
9.3 功率谱估计.....	(424)
习题	(435)
上机作业指导书	
用FFT作数字谱分析.....	(436)
附FFT程序 壹份.....	(440)
参考文献	(451)

绪 论

本章介绍有关信号处理的基本名词术语，概述了信号处理技术的应用与发展，介绍了课程的目的、内容与任务。

0.1 信号的定义与分类

信号可定义为一个转载信息的物理量函数。信息是反映一个物理系统的状态或特性的预先不知的报导。而一个物理系统的状态和特性是以各种物理量的性质、数量及其相互函数关系来表达的，因此信号为了转载信息表现为物理量的函数。

人们要获取信息，首先要获取信号，再通过对信号的分析与处理，才能取得需要的信息。例如医生要取得一个病人是否有心脏病的信息，往往先让病人作一个心电图。心电图实质上是一种与人的心脏跳动有关的生物电位信号。它是生物电位随时间变化的函数，并最终与曲线图表示出来，见图0.1-1。医生根据他的专业知识对此心电信号作出分析与处理，才能得到是否有病的信息。图0.1-1中前面部分是正常心电图，后面部分则为阵发性心动过速。

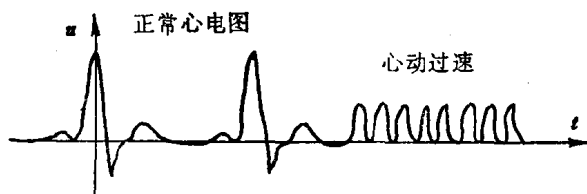


图 0.1-1 人的心电信号

飞机是一个复杂的物理系统。驾驶员及机务人员要获得飞机的飞行状态与发动机的工作是否正常这一信息，就首先要取得表征飞机飞行状态的多种物理量如飞行高度、飞行速度、航向等随时间变化的函数关系，以及表征发动机工作状态的各种物理量，如温度、压力、转速、振动等参数随时间变化的函数关系。通常在飞机上用相应的传感器将这些物理量转变为电压或电流随时间变化的电信号。驾驶员或机务人员在获得这些信号后，还必须根据一定专业知识对这些信号进行一定分析与处理，才能最终取得飞机飞行是否正常这一未知的信息。

从上述这些例子中，使我们对信号的定义有了进一步理解。信号中包含着人们未知的信息，但取得信号并不等于就获取了信息，必须通过对信号作进一步的分析与处理才能从信号中提取所需信息，所以说信号是便于转载信息的物理形式。

信号既是一个函数，因此在数学上可以表示为一个或几个独立变量的函数，亦可以用图形表示。

例如旋转机械的振动信号是振动位移 S 、振动速度 v 或振动加速度 a 与独立变量时间 t 的函数，可写作 $S=f(t)$ 、 $v=f(t)$ 或 $a=f(t)$ 等或用图形表示如图0.1-2。

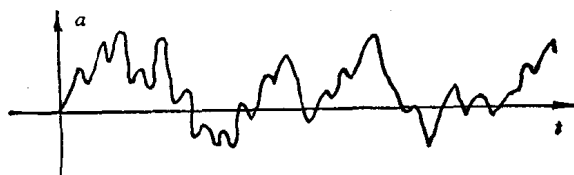


图 0.1-2 振动信号的图形表示

又如图象信号可表示为物体亮度 L 与二元空间变量(平面上点的位置)之间二元函数关系，可写为 $L=f(x, y)$ 。

为了便于信号的传输、处理，信号的函数值所代表的物理量通常都通过一定的测量传感器转换为电压或电流形式。这就是信

号最常见的形式——电信号。信号的自变量常常是时间。但信号还可以有其他多种形式，广义而言，各种文字、语言、图象、电码、古长城上的烽火、海军用的旗语、灯语等都是信号表现形式。

信号可以按不同角度来进行分类。

按时间变量取值方式不同，可将信号分为连续时间信号和离散时间信号。如果在所讨论的时间间隔内，对于任意时间值，都可给出对应的函数值，称为连续时间信号（简称连续信号）。对于连续信号，其函数值（或幅度）既可以是连续的，也可以是离散的，见图0.1-3（a）和（b）。时间和幅度都是连续的信号，又称模拟信号。如果信号只在某些离散的瞬时给出函数值，而在其他时间没有定义，则为离散时间信号（简称离散信号）。它也可分为幅度连续的和幅度离散的，见图0.1-3（c）和（d）。前者称为抽样信号，后者又称数字信号。

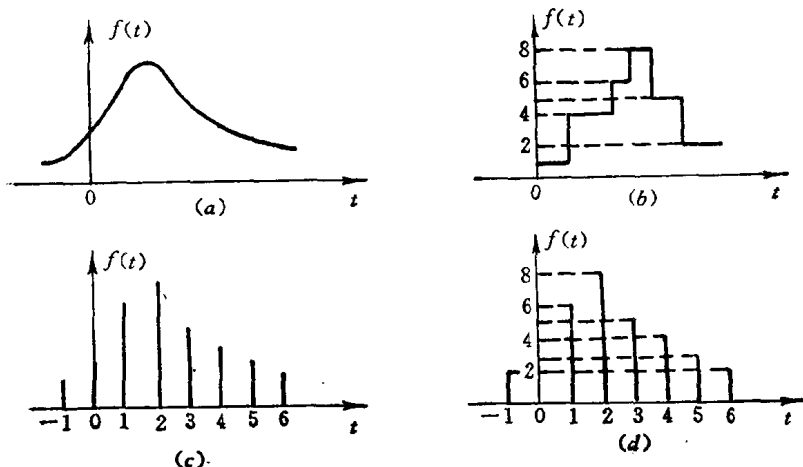


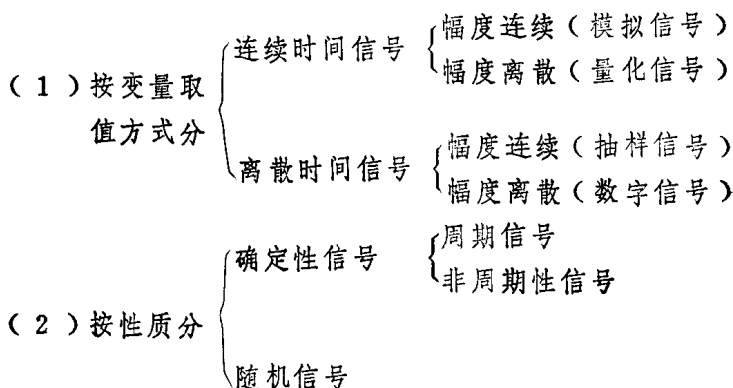
图 0.1-3 信号按变量取值方式分类

如按信号性质分，则可分为确定性信号和随机信号。若信号在相同试验条件下，能够重复实现，因此信号可以表示为一确定的

时间函数，给定某一时刻即可确定一相应的函数值，称为确定性信号。反之，如果在相同试验条件下，不能重复实现的信号，因此信号不能表示为一确定的时间函数，当给定某一时刻，函数值不能确定，只能知道它取某一数值的概率，称为随机信号。

确定性信号与随机信号是相对的。确定性信号在实际实现中往往伴有随机成分，只是当随机成分不大时，才把它认为是确定性信号。确定性信号还可分为周期信号与非周期信号。

信号分类可归结如下：



0.2 信号分析与处理技术 的应用与发展

如前所述，为了从信号中提取信息，首先必须对信号进行分析与处理。

信号分析是将一复杂信号分解为若干简单信号分量之和，并从这些分量的组成情况去考察信号的特性。信号分析是信号传输与处理的基础。其最常见的基本方法是信号的频谱分析。

信号处理可以理解为对信号的某种加工变换。其目的可能是

削弱信号中的多余内容；滤除混杂在信号中的噪声和干扰；也可能是将信号变换成易于识别的形式，便于提取它的特征参数等。信号滤波是信号处理中最基本的一种处理。由于信号分析的过程通常也需要对信号进行加工变换。因此从这种意义出发，不少书刊也把它认为是对信号的一种处理。

按对信号处理方法的不同，信号处理系统可分为模拟信号处理系统和数字信号处理系统两类。模拟信号处理系统的输入、输出信号均为模拟信号，其处理系统通常是由模拟元件 R 、 L 、 C 、及模拟电路构成的模拟系统，见图0.2-1。数字信号处理系统的

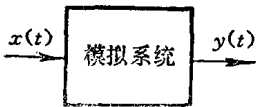


图 0.2-1 模拟信号处理系统框图

原理框图如图0.2-2。其处理系统的核心部分是计算机或专用数字硬件构成的数字系统。它的输入和输出均为

数字信号。输入数字信号 $x(n)$ 按预先给定的处理程序由数字系统进行处理后，得到输出数字信号 $y(n)$ 。在多数情况下，原始信号通常是模拟信号，为了将其转换成数字信号 $x(n)$ 进行数字处理，系统中通常还包含模-数转换环节（A/D），而为了将输出信号更好地显示或记录下来，还配有数-模转换环节（D/A），将数字输出信号 $y(n)$ 转换为模拟信号 $y(t)$ ，以便用 x 、 y 记录仪、磁带机记录下来，或者在终端上显示出来，也可将数字信号 $y(n)$ 直接在打印机上打印出来。包含A/D和D/A环节的数字信号处理系统等效为一个模拟系统，但其根本的区别点在于信号处理的数字

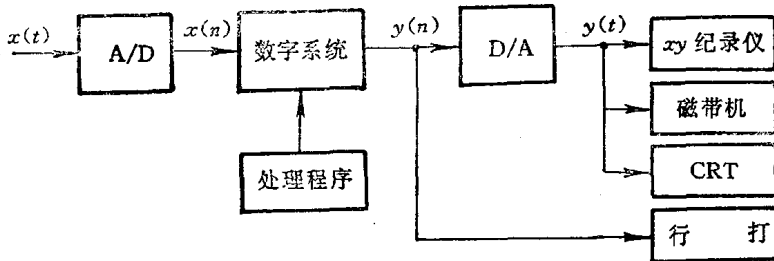


图 0.2-2 数字信号处理系统框图

方法，并由此带来的一系列优点。

与模拟信号处理相比数字信号处理具有如下优点：

1. 处理功能强

数字信号处理可以完成许多模拟系统感到困难甚至难以完成的复杂的信号处理任务。以信号的谱分析为例，模拟系统通常要采用大量的窄带滤波器来构成，不仅处理功能有限，而且分辨力低，分析时间长。而现代数字谱分析仪采用快速傅里叶变换算法（FFT），对于1024点序列作谱分析只须十几毫秒甚至几毫秒，实时处理能力很强，而且频谱分辨能力也很强，在超低频段（1Hz）可达1mHz量级，在高频段（100kHz），可达250Hz，甚至更小，而且运算及输出功能极其丰富。又如在自动控制工程中需要过滤数赫或十数赫的信号，采用模拟滤波，其电感电容数值可能大得惊人而不易实现，但采用数字滤波方法却显得轻而易举。又如图象信号处理正是利用数字计算机具有庞大的存储单元及复杂的运算功能才得以实现。

2. 灵活性

对模拟系统而言，它的性能取决于构成它的一些器件如电阻、电感、电容的参数，如欲改变其性能就必须改变这些硬件参数，重新构成新系统。显然，这不是容易的事。对数字系统而言，它主要是由乘法器、加法器、寄存器、控制器等单元构成，系统的性能主要取决于系数的设置及其运算规则或程序。因此只要改变输入系数存储器的数据或改变运算程序，即能得到具有不同性能的系统，丝毫不会带来困难，具有高度的灵活性。

由于数字部件的高度规范性及其参数的灵活可变性，则一套数字系统可以当作几套不同系统去同时处理几路不同信号（只要系统运算速度足够高，在时间上能适当错开）。这就是所谓时分复用。同样，在处理器内部，一些基本环节也可复用。例如使输入序列反复通过一个二阶数字滤波器三次，则这一节滤波器就等效于一个三节滤波器级联的高阶滤波器。时分复用能节省硬件，降

低成本。

3. 精度高

模拟系统的精度主要取决于元器件的精度，一般模拟器件的精度达到 10^{-3} 已很不易。而数字系统的精度主要取决于字长，16位字长即可达 10^{-4} 以上，更高的位数与精度目前也能做到。

4. 稳定性好

模拟系统中各种器件参数易受环境条件的影响，如产生温度漂移、电磁感应、杂散效应等。而数字系统只有表示0、1两个电平，受这些因素的影响要小得多。

当然与模拟系统相比，数字信号处理系统也有不足的方面。首先是实时性问题。被处理的原始信号通常是连续的，必须先经过抽样量化变成数字信号，然后对每一离散瞬间的输入数据进行一定运算、传输才能得到相应时刻的输出。显然这种变换、运算、传输必然会带来一定时延，产生实时性问题。这是模拟系统中所没有的，但却是数字系统中突出的问题。解决问题的关键取决于数字系统的运算速度，但目前一般A/D变换器及其数字硬件速率也只有几十兆赫，再加上运算化费的时间，因而还不能处理很高频率。其次，为了解决实时性问题，往往就需要设计专用数字硬件系统。这就带来了设计与结构的复杂性，并使成本增加，相比之下，对于一些较为简单的信号处理任务，模拟系统就显得结构简单而成本低廉。

总的来说，由于数字信号处理有突出优点，并且随着大规模集成电路技术的不断发展，它的实时性问题正在不断地得到解决。信号处理的总的发展趋势还是由模拟信号处理向着数字信号处理的方向发展，尤其是对一些复杂的信号处理任务更是如此。

下面回顾一下信号处理科学的发展历史。

在60年代前，信号处理主要还是依靠模拟设备来实现的。随着数字计算机技术的发展，促使人们开始想利用它的运算功能来代替模拟设备。但当时限于计算机技术的发展水平，它的运算速

度不够高，价贵、体大，而且有些数字处理算法上没有突破。在当时想把数字系统付诸实现还是不切实际的想法。因此数字信号处理只局限于某些仿真及离线数据处理上。随着大规模集成电路的迅速发展，计算机的运算速度迅速提高，体积缩小，成本下降，尤其是1965年，库利（J.W.Cooley）、图基（J.W.Tukey）发明了一种快速傅里叶变换算法（简称FFT），把计算傅里叶变换的时间减少了几个数量级，取得了数字信号处理算法上的重大突破。它的出现不仅使实时信号的数字谱分析成为可能，而且为时域信号的快速处理提供了新的途径，因此这种高效快速算法被广泛应用于数字信号处理的许多环节中，大大地推动了数字信号处理科学的发展。随着超大规模集成电路技术的迅猛发展及微处理机的出现，使各种数字信号处理的器件及设备大量涌现。目前国际市场上已有专用的数字滤波器、高性能数字谱分析仪、实时图象处理系统、声码器及语音合成器、FFT单板机、阵列处理器等产品出售。尤其值得注意的是，80年代初推出的高速通用数字信号处理单片机，为解决数字信号处理实时性及减少设计复杂性迈出了极重要的一步。以美国TI公司生产的TMS320系列的数字信号处理单片机（DSP芯片）为例，指令周期为200ns，其内部有专用乘法器，一次 $16 \times 16\text{bit}$ 的乘法运算仅需200ns，以此为基础的1024点FFT运算只需几个毫秒，且通用性强，具有完整的指令系统，可由用户编程，设计方便。DSP的高速运算能力及其通用性，不仅解决了信号实时处理问题，而且使设计工作大为简化，被认为是信号处理技术向更大规模实用发展的又一里程碑。

信号处理技术的发展与应用是相辅相成的两个矛盾侧面。工业方面应用的需求是信号处理技术发展的动力，而信号处理技术的发展又反过来扩展了它的应用领域。

回顾信号分析与处理技术的应用已有长久的历史，其中获得最早和最广泛的应用领域应数电子通讯工程。通讯信号的发送与