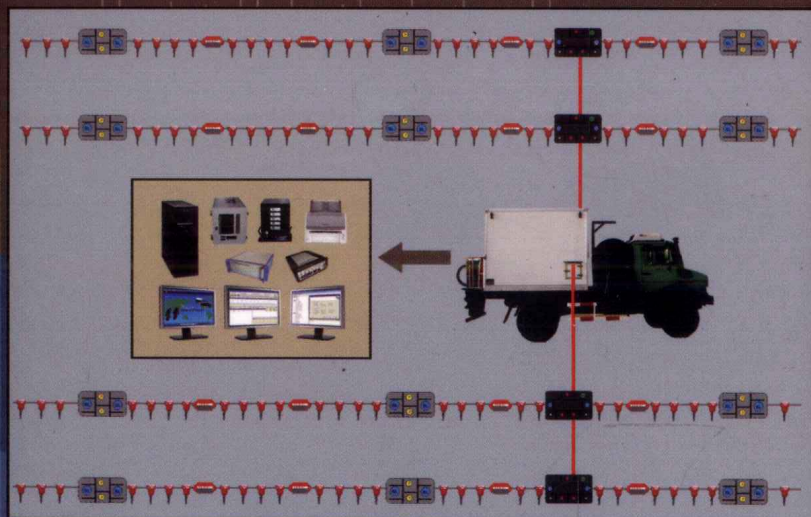


易碧金 姜 耕 刘益成 穆群英 著

地震数据采集站 原理与测试

Seismic Data Acquisition Station
Principle and Test



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

地震数据采集站原理与测试

Seismic Data Acquisition Station Principle and Test

易碧金 姜 耕 刘益成 穆群英 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

本书全面论述地震数据采集站的基本原理、系统构成和测试方法。全书分为5章,第1章作为基础,介绍地震数据采集站所涉及的信号处理的基本理论。第2章说明作为现代地震数据采集站核心的过抽样 $\Sigma\text{-}\Delta$ A/D与D/A转换器的原理及其典型器件。第3章从地震勘探对地震数据采集的要求出发,详细描述以 $\Sigma\text{-}\Delta$ A/D与D/A转换器为核心的现代地震数据采集站的原理、结构及各个重要部件的组成。第4章从信号处理的理论出发,论述地震数据采集站各主要技术指标的测试方法。第5章介绍测试地震数据采集站的仪器与测试实例。

本书作为第一本系统描述数据采集系统测试方法的专著,可供从事有关数据采集与处理特别是地震勘探与开发数据采集系统和地球物理仪器研制、使用及维护的科技人员参考,或作为从事设备计量与检定、设备校准人员的培训教材,也可作为高等院校相关专业教学参考书和教材。

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

地震数据采集站原理与测试 / 易碧金等著. —北京:电子工业出版社,2010.8
ISBN 978-7-121-11507-3

I. ①地… II. ①易… III. ①地震数据—数据采集 IV. ①P315.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第149641号

责任编辑:凌毅

印刷:北京市天竺颖华印刷厂

装订:三河市鑫金马印装有限公司

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:720×1000 1/16 印张:12.75 字数:262千字

印次:2010年8月第1次印刷

印数:2000册 定价38.00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。联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

地震勘探是目前最主要的油气、煤炭地球物理勘探方法。常规地震勘探的基本原理是通过向地下发射人工产生的地震波,当地震波在地下传播时遇到地下不同岩层的界面发生反射和折射并返回到地表,被放置在地表或井中的传感器(称为地震检波器)阵列所检测,然后对采集到的地震信号进行处理从而获取地下地质构造和岩石性质的信息。因此,如何准确、有效地采集到从地下反射或折射回的地震信号是地震勘探的首要任务,地震勘探仪器或地震数据采集系统就是用于完成这一任务的设备。自从地震勘探出现以来,随着电子技术、计算机技术和信息科学的迅速发展,以及石油地球物理勘探的日益深入,地震勘探仪器的发展走过了从模拟光电记录地震仪、模拟磁带记录地震仪、集中式数字地震仪、常规的分布式遥测地震仪,直到目前的超大规模的地震数据采集系统等各个发展阶段。地震数据采集系统主要由三个大的部分组成:其一为数据采集部分,包括地震检波器和数据采集站;其二为数据传输部分,包括电缆(或无线链路)和交叉站;最后是用来收集并保存地震数据的主机系统。这三个部分都是不可缺少的,共同决定了地震勘探的准确性与勘探效率。为了勘探的准确性,通常对勘探所采集的地震数据有所谓高精度、高信噪比和高分辨率的“三高”要求。“三高”要求数据的获取除了地震勘探的方法外,最重要的保证就是地震数据采集站,地震数据采集系统的许多技术指标都是针对它提出的,它是整个地震数据采集系统中最重要部件之一,而且无论是有线地震采集系统还是无线系统,也无论是用于陆上还是用于海上的采集设备,采集站都是基本相同的。鉴于目前还没有对地震数据采集站进行系统研究的书籍,因此本书对其基本原理、系统构成与测试方法进行了详细论述。

全书分为5章,第1章作为基础介绍了地震数据采集站所涉及的信号处理的基本理论,重点论述了模拟信号数字处理的基本理论与分析方法。第2章重点说明了作为地震数据采集站的核心器件——过抽样 $\Sigma\Delta$ A/D与D/A转换器的原理。第3章从石油地震勘探对地震数据采集的要求出发,简要介绍了现代大型地震勘探数据采集系统的组成,说明了地震数据采集站的作用及其主要技术指标,重点论述了现代地震数据采集站的原理与系统构成,详细说明了数据采集站的结构及各个重要部件。第4章从信号处理的理论出发,详细研究了数据采集站各主要技术指标的测试方法,给出了理论推导和相应的测试框图。第5章介绍了测试地震数据采集站的设备及测试实例。

本书是一本关于地震数据采集站的专著,其主要目标是为地震数据采集站的研制、测试、使用和维护提供理论基础与技术方法;同时本书的内容也可作为研究其他类型数据采集系统的参考。

本书是在中国石油集团“新型地震数据采集记录系统的研制”项目(中国石油天然气集团公司“十一五”重大科技项目)的资助下完成的,并得到了长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室的资助。中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司相关部门对本书介绍的方法做了大量的验证工作,并提供了大量的测试数据,在此对有关人员表示诚挚的感谢。

在整个编写期间,得到了陈联青总工程师、罗富龙总工程师、罗兰兵高级工程师的指导和帮助,巩庆刚工程师、胡朝炜老师、沈孝科老师为测试系统硬件的制作与测试程序的调试、实验做了大量工作,在此一并深表谢意。

由于作者水平有限,缺点和错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 信号处理基础	1
1.1 离散时间信号	1
1.1.1 离散时间信号及其时域表示	1
1.1.2 序列的基本运算	2
1.1.3 一些常用序列	3
1.1.4 用单位脉冲序列表示任意序列	4
1.2 离散时间系统及其时域分析	5
1.2.1 线性时不变系统	5
1.2.2 线性时不变系统的构成	5
1.2.3 线性时不变系统的差分方程描述	6
1.2.4 线性时不变系统的求解	6
1.2.5 系统的因果性与稳定性	7
1.3 连续时间信号的数字处理	8
1.3.1 抽样定理与 A/D 转换器	8
1.3.2 抽样信号的恢复与 D/A 转换器	13
1.4 离散时间信号与系统的频域分析	15
1.4.1 序列的 z 变换	15
1.4.2 序列的傅里叶变换	18
1.4.3 离散时间系统频域分析	21
1.5 离散傅里叶变换及其快速算法	24
1.5.1 有限长序列的离散傅里叶变换	24
1.5.2 DFT 的一些性质	25
1.5.3 DFT 的快速算法——FFT	28
1.5.4 DFT 与 FFT 在频谱分析中的应用	33
1.6 数字滤波器概述	37
1.6.1 数字滤波类型与指标	37
1.6.2 FIR 线性相位数字滤波器	40
1.6.3 最小相位数字滤波器	42
1.6.4 梳状滤波器	44
参考文献	46
第 2 章 过抽样 Σ - Δ 转换器	48
2.1 概述	48
2.2 量化与量化噪声	49

2.3	Σ - Δ 调制器	55
2.3.1	Σ - Δ 调制器的基本概念	55
2.3.2	一阶 Σ - Δ 调制器的传输特性及量化信噪比	59
2.3.3	高阶 Σ - Δ 调制器	62
2.4	数字抽取滤波器	64
2.4.1	序列的重抽样及其频谱	65
2.4.2	Σ - Δ A/D 转换器的动态范围与采样率、字长的关系	69
2.4.3	抽取滤波的实现	70
2.5	Σ - Δ D/A 转换器与数字插值滤波器	72
2.5.1	Σ - Δ D/A 转换器	72
2.5.2	数字插值滤波器	73
2.6	Σ - Δ A/D 转换器 CS5372/CS5376 组件	76
2.6.1	Σ - Δ 调制器 CS5372	76
2.6.2	数字抽取滤波器 CS5376	84
	参考文献	98
第 3 章	地震数据采集站原理	100
3.1	地震勘探简介	100
3.1.1	地震勘探概述	100
3.1.2	地震数据采集系统及其野外工作方式	101
3.1.3	地震勘探对地震数据采集系统的要求	102
3.1.4	地震数据采集站的主要技术指标	105
3.2	地震数据采集站结构	106
3.2.1	传统地震数据采集站的局限性	107
3.2.2	基于 Σ - Δ A/D 转换器的地震数据采集站采集模块结构	108
3.2.3	现代地震数据采集站的总体结构	109
3.3	地震数据采集站采集模块	109
3.3.1	低噪声放大器	110
3.3.2	A/D 转换器接口	113
3.3.3	嵌入式处理器与控制电路	114
3.3.4	内置高精度测试信号源	117
3.4	数据传输与接口	120
3.4.1	地震数据采集系统中常用的传输技术	120
3.4.2	采集站与数据传输电缆接口	127
3.4.3	传输协议	128
3.4.4	检波器接口	134
3.5	电源及其他	135
3.5.1	电源配置	135
3.5.2	防雷击与防静电	136

3.5.3 机壳设计	138
参考文献	139
第4章 采集站测试原理和计算方法	140
4.1 概述	140
4.2 直流漂移与噪声的测试方法	141
4.3 谐波畸变测试方法	143
4.4 计时精度测试方法	148
4.5 增益精度测试方法	151
4.6 相位特性测试方法	153
4.7 系统延时测试方法	158
4.8 频带特性测试方法	162
4.9 陷波特性测试方法	164
4.10 共模抑制比测试方法	166
4.11 串音干扰测试方法	167
4.12 一致性测试	169
4.13 测试误差分析	171
参考文献	174
第5章 地震数据采集站测试仪器	175
5.1 概述	175
5.2 采集站测试仪器的结构	176
5.2.1 对测试仪器的要求	176
5.2.2 测试仪器硬件结构	177
5.2.3 测试仪器软件结构	178
5.2.4 高精度信号源	179
5.2.5 高精度计时器	181
5.3 采集站测试数据获取	181
5.3.1 测试数据采集控制软件	181
5.3.2 测试接口网络配置	183
5.4 测试仪器数据处理系统	184
5.4.1 处理系统的结构	184
5.4.2 数据处理结果保存与显示	185
5.5 采集站测试实例	186
参考文献	192

第 1 章 信号处理基础

地震勘探包括两个主要内容,一个是地震勘探数据的获取,另一个是地震数据的处理和解释。数据的获取由地震数据采集系统完成,处理和解释则由专用的计算机系统 and 软件完成。信号处理是这两个方面的重要基础之一。本章将简要介绍在地震数据采集系统中所涉及的信号处理知识,这些知识包括离散时间信号与系统分析方法、模拟信号的数字处理方法、离散傅里叶变换及数字滤波器的基础知识。

1.1 离散时间信号

1.1.1 离散时间信号及其时域表示

离散时间信号在物理上是指定义在离散时间上的信号样品的集合,这样的样品集合可以是本来就存在的,也可以是对像地震信号这样的模拟信号通过抽样离散化得来的。离散时间信号在数学上可用时间序列 $\{x(n)\}$ 来表示。其中 $x(n)$ 代表序列的第 n 个样点的数字, n 代表时间的序号, n 的可取值范围为 $-\infty < n < \infty$ 的整数, n 取其他值 $x(n)$ 没有意义。

离散时间信号的表示方法有 3 种方式。

1. 枚举法

例如:

$$\{x(n)\} = \{\dots, -1.5, -8.7, 2.53, 0.0, 6, 7.2, 1, -5.6, \dots\}$$



上面的箭头指定时间零点的位置。在上面表示的离散信号中有:

$$x(-1) = -8.7, x(0) = 2.53, x(1) = 0.0, \dots$$

2. 用公式表示

例如:

$$x(n) = \sin \omega n \quad -\infty < n < \infty$$
$$x(n) = \begin{cases} a^{-n} & n \geq 0, |a| \geq 1 \\ b^n & n < 0, |b| \geq 1 \end{cases}$$

3. 用图形表示

如图 1-1-1 所示。图中横坐标 n 表示离散的时间坐标,但仅在 n 为整数时才有

意义。纵坐标则代表信号样点的值。

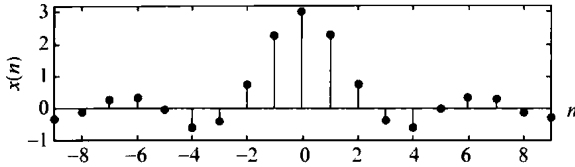


图 1-1-1 离散信号的图形表示

1.1.2 序列的基本运算

离散信号处理中有以下几种最基本运算。

1. 序列的加减

序列的加减指将两序列序号相同的数值进行相加减,即

$$y(n) = x_1(n) \pm x_2(n)$$

2. 序列的乘积

序列的乘积指将两序列序号相同的数值相乘,即

$$y(n) = x_1(n) \cdot x_2(n)$$

3. 序列的延时

序列的延时是将序列全体在时间轴上移动,即

$$y(n) = x(n - n_0)$$

$n_0 < 0$ 左移, $n_0 > 0$ 右移。

4. 序列乘常数

序列乘以常数指将序列的每一个值都乘以常数,即

$$y(n) = ax(n)$$

5. 序列的反褶

序列的反褶是将序列以 $n=0$ 为对称轴进行对褶,即

$$y(n) = x(-n)$$

6. 序列的差分运算

序列的差分运算指同一序列相邻两个样点之差,分为前向差分和后向差分。

前向差分

$$\Delta x(n) = x(n+1) - x(n)$$

后向差分

$$\nabla x(n) = x(n) - x(n-1)$$

当对序列进行多次差分时,就变成了高次差分,例如,二次差分

$$\begin{aligned}\nabla^2 x(n) &= \nabla [\nabla x(n)] = \nabla x(n) - \nabla x(n-1) \\ &= x(n) - 2x(n-1) + x(n-2)\end{aligned}$$

差分运算是离散线性系统差分方程描述及 Σ - Δ A/D 和 D/A 转换器的基础。

1.1.3 一些常用序列

有几种最常用的简单时间序列,这些序列在数字信号处理中具有十分重要的作用。

1. 单位脉冲序列 $\delta(n)$

该信号仅在 $n=0$ 时,取确定值 1,其他时刻都为零。如图 1-1-2 所示,其表达式为

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (1-1-1)$$

$\delta(n)$ 在离散信号和系统中的作用和冲激函数 $\delta(t)$ 在连续信号和系统中的作用一样重要。

2. 单位阶跃序列 $u(n)$

$$u(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (1-1-2)$$

单位阶跃序列 $u(n)$ 见图 1-1-3。它与单位脉冲序列的关系为

$$\delta(n) = u(n) - u(n-1)$$

$$u(n) = \sum_{m=0}^{\infty} \delta(n-m)$$

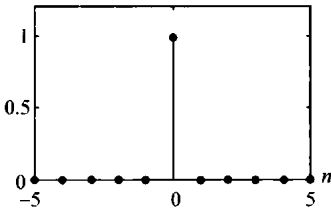


图 1-1-2 单位脉冲序列 $\delta(n)$

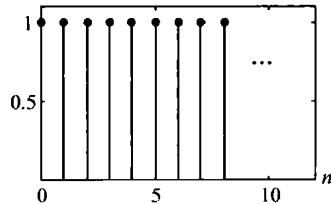


图 1-1-3 单位阶跃序列 $u(n)$

3. 矩形序列 $R_N(n)$

$$R_N(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1-1-3)$$

它与 $u(n)$ 的关系为

$$R_N(n) = u(n) - u(n-N)$$

图 1-1-4 为矩形序列 $R_N(n)$ 的示意图。

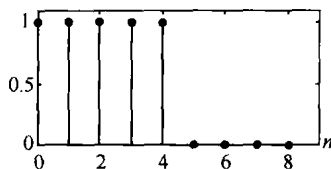


图 1-1-4 矩形序列 $R_N(n)$ 的示意图

4. 复指数序列

$$x(n) = e^{(\sigma + j\omega_0)n} \quad (1-1-4)$$

式中, ω_0 为数字频率, 有关数字频率的概念将在后面详细说明。将复指数表示成实部与虚部为

$$x(n) = e^{\sigma n} \cos \omega_0 n + j e^{\sigma n} \sin \omega_0 n \quad (1-1-5)$$

当 $\sigma = 0$ 时

$$x(n) = \cos \omega_0 n + j \sin \omega_0 n \quad (1-1-6)$$

其实部与虚部分别为余弦与正弦序列。图 1-1-5 为示意图。

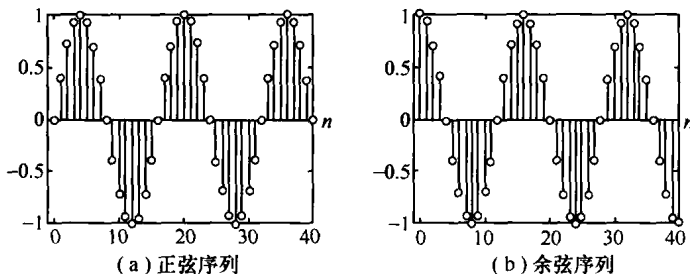


图 1-1-5 $\sigma = 0$ 时由复指数序列退化成的正弦与余弦序列

1.1.4 用单位脉冲序列表示任意序列

任意序列 $x(n)$ 都可用单位脉冲序列 $\delta(n)$ 表示成加权和的形式

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) \delta(n-m) \quad (1-1-7)$$

上述表达式在离散系统分析中是一个十分有用的公式。例如:

$$x(n) = \begin{cases} a^n & -10 \leq n \leq 10 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

可表示为

$$x(n) = \sum_{m=-10}^{10} a^m \delta(n-m)$$

1.2 离散时间系统及其时域分析

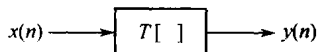
1.2.1 线性时不变系统

所谓离散时间系统,是指将输入序列变换成输出序列的一种运算。在数学上通常将系统表示成一种变换。设离散时间系统的输入序列 $x(n)$,经过系统的规定运算,变成输出序列 $y(n)$,用 $T[\]$ 表示变换关系,如图 1-2-1 所示,则有

$$y(n) = T[x(n)] \quad (1-2-1)$$

在离散时间系统中,最基本的系统是线性时不变系统,它是研究其他系统的基础。该系统具有以下性质。

1. 线性性



若系统满足叠加原理

图 1-2-1 系统的变换关系

$$\begin{aligned} y_1(n) &= T[x_1(n)], y_2(n) = T[x_2(n)] \\ y(n) &= T[a_1 x_1(n) + a_2 x_2(n)] = a_1 T[x_1(n)] + a_2 T[x_2(n)] \\ &= a_1 y_1(n) + a_2 y_2(n) \end{aligned} \quad (1-2-2)$$

则称该系统为线性系统。

2. 时不变特性

若系统的变换关系不随时间变化,或者说系统的输出随输入的移位而相应移位但形状不变,则称该系统为时不变系统,用公式表示,设

$$y(n) = T[x(n)]$$

那么一定有

$$T[x(n-n_0)] = y(n-n_0) \quad n_0 \text{ 为常数} \quad (1-2-3)$$

1.2.2 线性时不变系统的构成

线性时不变系统由以下 3 个元件组成,它们与离散信号的相加、乘常数及延时 3 种基本运算相对应。

① 加法器,用于实现序列的加法运算,其图形表示见图 1-2-2(a)。

② 系数乘法器,用于实现序列的乘以常数的运算,在物理意义上相当于放大器。其图形表示见图 1-2-2(b)。

③ 延时器,用于实现序列的延时操作,在物理上可由移位寄存器来实现。其图形表示见图 1-2-2(c)。

图 1-2-3 是一个由这些元件构成的简单的线性时不变系统,其数学表达式为

$$y(n) = ay(n-1) + x(n) \quad (1-2-4)$$

采用更多的元件可构成更复杂的系统,但不管多复杂的系统,都是由这 3 个元件组成的。

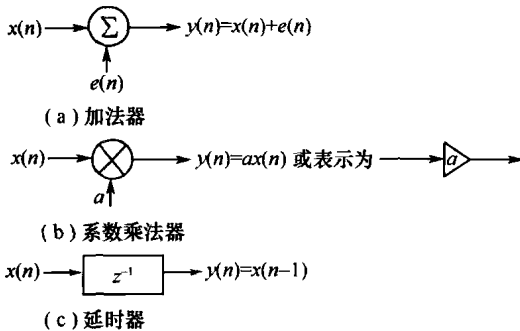


图 1-2-2 组成线性时不变系统的基本元件

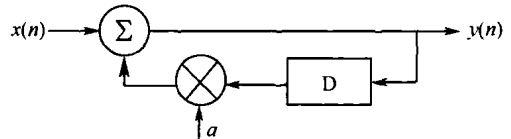


图 1-2-3 一个简单的线性时不变系统

1.2.3 线性时不变系统的差分方程描述

在图 1-2-3 中,用基本元件构成了一个简单的线性时不变系统,其数学表达式为式(1-2-4),该表达式是一个一阶差分方程,对于一般的更复杂的离散时间线性时不变系统,可用以下形式的高阶常系数线性差分方程来表示它们的输入、输出关系

$$y(n) = \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (1-2-5)$$

式中,系数 $a_k (k=1, \dots, N)$ $b_k (k=0, \dots, M)$ 是由系统结构决定的常数,不随时间的改变而改变。所谓线性是指方程中仅有 $y(n-k)$ 的一次幂且不存在它们的相乘项。差分方程阶数用方程式中 $y(n-k)$ 的最高阶与最低阶之差来表示,对于式(1-2-5),其阶数为 N 。差分方程的阶数代表了系统的复杂程度,在实际工作中,通常也称它为线性系统的阶数,对数字滤波器这种专用的线性系统,也将系统的阶数称为滤波器的节数。系统的阶数由构成系统中的延时器的个数决定。

1.2.4 线性时不变系统的求解

对任何一个系统最关心的是给定系统的输入后,求得系统的输出,由输入求输出的过程的称为对系统的求解。对线性时不变系统而言,求解系统的方法分为时域法和频域法。有关频域法将在后面讨论,这里先讨论时域方法。时域方法主要有两种:一种是直接求解差分方程;另一种是由系统的单位脉冲响应通过卷积的方法求系统输出。

1. 差分方程的直接求解

直接求解差分方程常用的方法有：①经典解法，②递推方法。直接求解差分方程时，一般要首先根据系统的具体情况，给出初始条件，当初始条件为零时，所得的解称为零状态响应。若初始条件不为零，还必须考虑零输入响应，即由系统的初始储能产生的响应。若输入的信号为单位脉冲 $\delta(n)$ 时，所得的零状态响应解就是系统的单位脉冲响应。具体解法可参阅有关“数字信号处理”的书籍。

2. 线性时不变系统的单位脉冲响应与卷积求解

当线性时不变系统的输入为单位脉冲 $\delta(n)$ 时，此时系统的输出 $y(n)$ 称为单位脉冲响应。通常用 $h(n)$ 表示，即

$$h(n) = T[\delta(n)] \quad (1-2-6)$$

若已知系统的 $h(n)$ ，对于任意的输入 $x(n)$ ，利用线性时不变特性可求得其输出 $y(n)$ 为

$$\begin{aligned} y(n) &= T[x(n)] = T\left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)\delta(n-m)\right] \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)T[\delta(n-m)] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)h(n-m) \\ &\triangleq x(n) * h(n) \end{aligned} \quad (1-2-7)$$

称式(1-2-7)为 $x(n)$ 与 $h(n)$ 的线性卷积，用符号“ $*$ ”表示。它是线性系统分析中最重要的公式之一，它说明线性时不变系统的响应等于输入序列与单位脉冲响应序列的卷积。这表明 $h(n)$ 实际上代表了系统的输入/输出特性，因此在许多时候，直接用 $h(n)$ 来代表系统，如图 1-2-4 所示。由于 $h(n)$ 实际上是一个序列，由此可见，从数学上说信号和系统是统一的，都可用序列来表示。

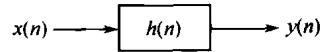


图 1-2-4 系统的 $h(n)$ 表示

1.2.5 系统的因果性与稳定性

1. 系统的因果性

因果性是指系统在 n 时刻的输出仅取决于 n 时刻和 n 时刻以前的输入，而与 n 时刻以后的输入无关。因果性说明了系统的可实现性，如果系统的输出与将来的输入有关，该系统为非因果系统，因而是不可实现的。可以证明，线性时不变系统具有因果性的充要条件为

$$h(n) = h(n)u(n) \quad (1-2-8)$$

类似地，如果一个序列 $x(n)$ 满足

$$x(n) = x(n)u(n) \quad (1-2-9)$$

即在 $n < 0$ 时, $x(n) = 0$, 则称该序列为因果序列。

2. 系统的稳定性

所谓系统的稳定性是指系统对于任何有界输入, 输出也应有界的, 通常称这种稳定性为有界输入-有界输出(BIBO)稳定性。可以证明系统的稳定条件为

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h(n)| < \infty \quad (1-2-10)$$

1.3 连续时间信号的数字处理

在现实世界中的各种信号大都是在时间上连续的模拟信号, 例如语音信号、地震信号, 就是典型的模拟信号。随着电子技术、计算机技术和信息科学的迅速发展, 数字信号处理系统与模拟信号处理系统相比在系统的精度与功能、稳定性、可靠性、成本、小型化、节能等各个方面都有显著的优点, 信号的数字处理方法已经成为了当前信号与信息处理的主要手段, 许多模拟信号都采用数字处理方法。例如, 地震勘探系统就是一个典型的数字信号处理系统。为了能利用数字系统来处理模拟信号, 首先必须将模拟信号转换成数字信号, 在数字系统中进行处理后再转换成模拟信号。图 1-3-1 是模拟信号数字处理系统的典型框图。在框图前面的虚线框中, 输入的模拟信号经传感器、预放、滤波等预处理后送给 A/D 转换器转换成数字信号, 这一部分通常称为数据采集, 采集所得的数字信号送入计算机或专用数字设备进行处理, 最后再将处理后的数字信号经相反的转换器, 即数模(D/A)转换器, 转换成模拟信号并经过平滑滤波处理后输出进行利用, 这后一部分有时也称为回放(Playback)。本节将介绍模拟信号与数字信号之间相互转换的基本原理。

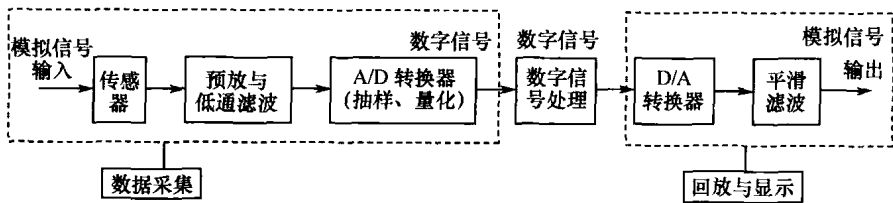


图 1-3-1 模拟信号数字处理系统的典型框图

1.3.1 抽样定理与 A/D 转换器

模拟信号数字处理的第一个工作就是将在时间上连续的模拟信号离散化, 使之变成在时间上离散化的信号。信号离散化的过程就是将连续时间信号进行抽样, 仅抽取信号波形某些特定时刻的样值。当抽样时刻取均匀等间隔点时为均匀抽样, 否则为非均匀抽样。由于实际工作中大都是均匀抽样, 下面只讨论这种情况。

1. 理想抽样及其频谱

均匀抽样可以看作为一个脉冲调制过程。调制信号为输入的模拟信号 $x_a(t)$ ，载波信号是一串周期为 T ，脉宽为 τ 的矩形脉冲串 $p(t)$ ，调制后的输出就是抽样信号 $\hat{x}_a(t)$ ，即

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t)p(t) \quad (1-3-1)$$

这一过程将输入的连续模拟信号 $x_a(t)$ 转换成了脉冲串。显然，脉冲的脉冲宽度 τ 越小，抽样输出脉冲的幅度就越准确地反映出输入信号在离散抽样时刻点上的瞬时值。当 τ 趋于零的极限情况，脉冲序列 $p(t)$ 变成了冲激函数串，称这种抽样为理想抽样。在理想抽样时，冲激函数准确地出现在抽样瞬间，而它的面积则准确地等于输入信号在抽样瞬间的幅值。实际上理想抽样是不能实现的，但当 $\tau \ll T$ 时，就可近似看成是理想抽样。下面详细讨论理想抽样的情况，图 1-3-2 是理想抽样过程的示意图。

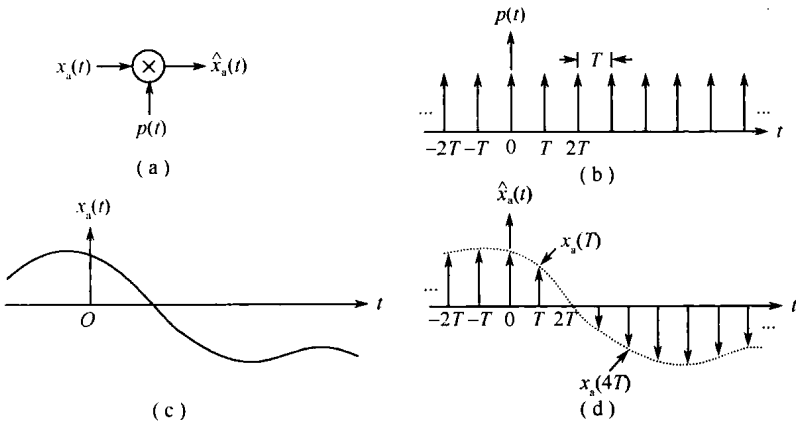


图 1-3-2 理想抽样过程的示意图

用 $M(t)$ 表示冲激函数串

$$M(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT) \quad (1-3-2)$$

仍用 $\hat{x}_a(t)$ 表示理想抽样的输出，即

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t)M(t) \quad (1-3-3)$$

将式(1-3-2)代入式(1-3-3)得

$$\hat{x}_a(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x_a(t)\delta(t - mT)$$

由于 $\delta(t - mT)$ 只在 $t = mT$ 时不为零，故有

$$\hat{x}_a(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x_a(mT)\delta(t - mT) \quad (1-3-4)$$