Shuzi Xinhao Chuli
Xiangmu Jiaocheng

数字信号处理项目教程

主　编　刘晓阳　闫青

西南交通大学出版社

国家骨干高职院校央财支持重点专业建设成果

数字信号处理项目教程

主　编　刘晓阳　闫　青
副主编　郭振慧　张志华　王亮亮　初风钦

西南交通大学出版社
·成 都·

图书在版编目（CIP）数据

数字信号处理项目教程／刘晓阳，闫青主编．—成都：西南交通大学出版社，2015.2
ISBN 978-7-5643-3759-9

Ⅰ.①数… Ⅱ.①刘… ②闫… Ⅲ.①数字信号处理－高等职业教育－教材 Ⅳ.①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 034632 号

数字信号处理项目教程

主编　刘晓阳　闫　青

责任编辑	宋彦博
封面设计	米迦设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 （四川省成都市金牛区交大路 146 号）
发行部电话	028-87600564　028-87600533
邮政编码	610031
网　　址	http://www.xnjdcbs.com
印　　刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印　　张	11
字　　数	275 千
版　　次	2015 年 2 月第 1 版
印　　次	2015 年 2 月第 1 次
书　　号	ISBN 978-7-5643-3759-9
定　　价	28.00 元

课件咨询电话：028-87600533
图书如有印装质量问题　本社负责退换

前言

目前，高职院校工科类特别是电类各专业，普遍开设了“数字信号处理”课程，目的是使学生掌握数字电路的信号分析与处理的基本知识、基本变换、分析算法，为其学习后续课程以及 DSP 处理器的开发与应用打下基础。但是作为一门专业基础课，其本身基础性、预备性的知识比较多，理论性比较强，不大容易激发兴趣和讲出特色。

为此，本书作者根据应用型人才的培养特点，在内容上略去了繁杂的数学公式推导和一些烦琐的运算、证明过程。本书总体上偏重于打牢基础，对于某些复杂的理论问题，仅做纲要式的说明或者点到为止。全书内容精练，逻辑清晰，图表丰富，实用性强。

本书按照 50 ~ 70 学时编写，并按照知识学习与能力培养的渐次梯度，共分为八个项目，每个项目再下设若干子项目。绪论及项目一主要介绍本课程的背景知识、基本概念，以及数字信号与系统的基本概念、性质和运算。项目二、项目三和项目四，依次介绍了数字信号处理的基本数学工具：序列的傅里叶变换、z 变换和离散傅里叶变换。该部分侧重于对基本原理和算法的介绍。项目五简单介绍了离散傅里叶变换的快速算法——快速傅里叶变换（FFT）的基本运算流程以及基 2 FFT 算法。项目六是对滤波器的综述性介绍，包含了模拟滤波器的一部分内容。项目七介绍了时域离散信号的基本网络结构，包括 IIR 结构和 FIR 结构，重点是系统函数、差分方程与信号流图的转化问题。项目八集中介绍了数字滤波器的设计，包括 IIR 型和 FIR 型的不同设计算法。每个项目后均附有项目小结、项目实训和习题。

MATLAB 是当前最优秀的科技应用软件之一，是学习和应用数字信号处理技术的重要工具。本书在每个学习项目的项目实训中，都设置了 MATLAB 的仿真实训。读者将自编程序或者实训中列出的程序输入计算机，运行后就可以得到相应的仿真结果，以帮助对知识的理解和运用。仿真实训项目是本书的特色之一。

学习本书前，建议读者先学习高等数学或工程数学、信号与系统等课程。

本书由济南职业学院的刘晓阳、山东商业职业技术学院的闫青担任主编，由济南职业学院的郭振慧、张志华，山东商业职业技术学院的王亮亮、初风钦担任副主编。同时，本书的编写也得到了青岛海信通信公司、济南钢铁股份有限公司有关技术人员的大力协助。全书由刘晓阳统稿。2014 年适逢济南职业学院“国家骨干高职院校”项目建设的收官之年，本书同时也是该项目重点建设专业——应用电子技术专业的建设成果之一。

本书在编写过程中参考了兄弟院校、相关企业和科研院所的一些教材、资料和文献，在此向有关作者一并致谢。

由于时间仓促，加之作者能力有限，书中内容尚有不少待改进之处，恳请广大读者和专家批评指正。

编　者

2014 年 11 月

目　录

波、变换、检测、谱分析、估计、压缩、识别等一系列加工处理。

数字信号处理的实现可以采取软件和硬件两种方法。软件方法是利用通用计算机，输入算法程序来实现，如时下较流行的 MATLAB，就是一款功能强大的信号处理软件。硬件方法是按照具体的要求和算法，设计专用的数字信号处理芯片，解决具体问题。数字信号处理芯片简称 DSP，如 TI 公司的 TMS320C5000 系列、TMS320C6000 系列等。目前，工程应用中更趋向于 DSP 芯片配置相应的信号处理软件，构成通用 DSP 芯片，即采用软硬件相结合的方法。目前，世界上三大 DSP 芯片生产商分别是德州仪器公司（TI）、模拟器件公司（ADI）、摩托罗拉（Motorola）公司。这三家公司几乎垄断了通用 DSP 芯片市场。

三、数字信号处理的优点

现代数字信号处理技术始于 20 世纪 60 年代，其奠基人是著名的美国信息论专家香农。随着当今电子计算机技术的飞速发展，数字信号处理的各种新理论、新算法、新技术仍然层出不穷。

数字信号处理相对于传统的模拟信号处理具有许多优点，如高灵活性、高精度、高稳定性、便于大规模集成等，尤其可以通过对数字信号的存储和运算，使系统获得高性能指标，达到许多模拟系统所无法实现的功能。例如，电视系统的各种视频特技、画中画、画面尺度变换，通过延时以实现非因果系统，等等。

当前，数字信号处理技术已经涉及人工智能、航空航天、模式识别、图像处理、通信、雷达、故障检测等许多领域。“数字信号处理”这一课程，也已成为电子信息类专业的一门重要专业基础课。本书主要介绍数字信号处理的基本原理、算法及其分析方法。

项目一 时域离散系统

> 项目要点：
>
> ① 各类典型时域离散信号的表达式、波形及其特性；
> ② 常用的序列运算、线性卷积运算；
> ③ 时域离散系统的性质；
> ④ 差分方程的递推法求解；
> ⑤ 采样定理的内容。

子项目一 时域离散信号

一、序 列

绪论中已讲到，时域离散信号即为序列。序列有三种表示方法。

（1）公式表示：通常用 $x(n)$表示序列，n 是序数，作为时间参量。根据序列的定义，n 要取整数，否则无意义。

（2）图形表示：在时域分析中以横轴作为时间轴，用纵轴表示幅度，在二维的坐标系中表示出序列的波形，体现信号函数的运算关系。

（3）集合符号表示：将序列视为一组有序的数的集合，可以表示成集合的形式，如 $x(n)=\{\cdots 1, 2.5, 3.7, 0, 0.4\cdots\}$。这种形式常用于 MATLAB 编程中。

二、典型序列

1. 单位脉冲序列 $\delta(n)$

$$\delta(n)=\begin{cases}1, & n=0\\0, & n\neq 0\end{cases} \tag{1.1.1}$$

单位脉冲序列也称单位采样序列，如图 1.1.1 所示。其特点是当且仅当 n=0 时取值为 1，其他情况下取值均为零。

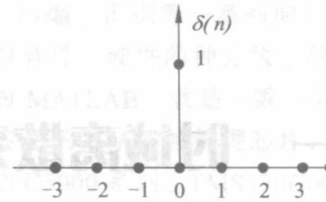

图 1.1.1　单位脉冲序列

2. 单位阶跃序列 $u(n)$

$$u(n)=\begin{cases}1, & n\geqslant 0\\ 0, & n<0\end{cases} \tag{1.1.2}$$

单位阶跃序列如图 1.1.2 所示。其特点是当且仅当 $n\geqslant 0$ 时取值为 1，$n<0$ 时取值为零。单位阶跃序列也可用单位脉冲序列来表示。

$$u(n)=\sum_{m=-\infty}^{n}\delta(n-m) \tag{1.1.3}$$

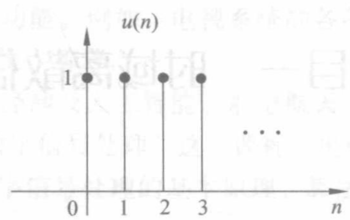

图 1.1.2　单位阶跃序列

同样，单位脉冲序列 $\delta(n)$ 也可以用单位阶跃序列来表示：

$$\delta(n)=u(n)-u(n-1) \tag{1.1.4}$$

3. 矩形序列 $R_N(n)$

$$R_N(n)=\begin{cases}1, & 0\leqslant n\leqslant N-1\\ 0, & 其他\end{cases} \tag{1.1.5}$$

式（1.1.5）中的 N 代表矩形序列的长度。N=4 时的矩形序列如图 1.1.3 所示。

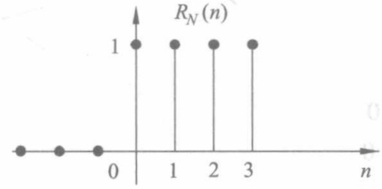

图 1.1.3　矩形序列

4. 实指数序列

$$x(n)=a^n u(n)\text{，}a\text{ 为实数} \tag{1.1.6}$$

式（1.1.6）中，a 的取值直接影响序列的波形。如图 1.1.4 所示，当 $a>1$ 时，x（n）的幅度随着 n 的增大而增大，此时称序列发散；当 $0<a<1$ 时，x（n）的幅度随着 n 的增大而减小，此时称序列收敛。

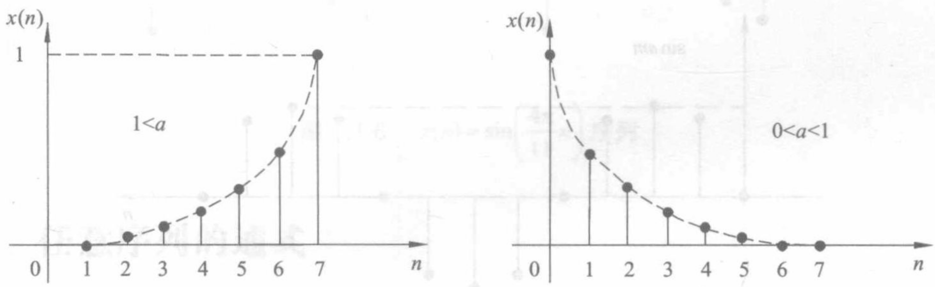

图 1.1.4 实指数序列

5. 复指数序列

$$x(n)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega n} \tag{1.1.7}$$

在式（1.1.7）中，ω 是数字域频率。在含有复指数序列的运算中，常用欧拉公式来实现复指数形式和三角函数形式之间的转换，如式（1.1.8）和式（1.1.9）所示。

$$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega n}=\cos\omega n+\mathrm{j}\sin\omega n \tag{1.1.8}$$

$$\begin{cases}\cos\omega n=\dfrac{1}{2}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega n}+\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n})\\ \sin\omega n=-\dfrac{1}{2}\mathrm{j}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega n}-\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n})\end{cases} \tag{1.1.9}$$

由于 n 要取整数，因此根据欧拉公式，只要令 M 取整数，则下列关系成立：

$$\cos[(\omega+2\pi M)n]=\cos\omega n\text{，}\quad \sin[(\omega+2\pi M)n]=\sin\omega n\text{，}\quad \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega+2\pi M)n}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega n}$$

这就表明复指数序列是以 2π 为周期的周期序列，因此在频率域只考虑一个周期（$[-\pi, \pi]$ 或者$[0, 2\pi]$）即可。

6. 正弦序列

$$x(n)=\sin\omega n \tag{1.1.10}$$

式（1.1.10）中的 ω 表示正弦序列的数字域频率，单位是弧度（rad）。弧度与角度的换算

关系是

$$1\ \text{rad}\approx\left(\frac{180}{\pi}\right)^{\circ}$$

本书中以 Ω 和 f 分别表示模拟角频率和模拟频率。ω 与模拟角频率 Ω 之间的关系是 $\omega=\Omega T$。

正弦序列如图 1.1.5 所示。

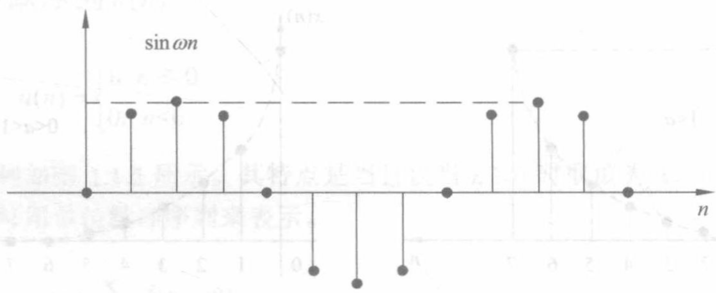

图 1.1.5　正弦序列

7. 周期序列

若对于任意的 n 都存在一个最小的正整数 N，令下面的等式成立，则称 $x(n)$为周期序列。

$$x(n)=x(n+N),\quad -\infty<n<\infty \tag{1.1.11}$$

序列的周期为 N。注意 N 只能是正整数。

对于形如 $x(n)=A\sin(\omega n+\varphi)$ 的正弦序列，其周期的判断有两种情况。

（1）若 $2\pi/\omega$ 为无理数，则该正弦序列非周期序列。

（2）若 $2\pi/\omega$ 为有理数，则该正弦序列是周期序列。此时如果 $2\pi/\omega$ 为整数，则该正弦序列的周期即为 $2\pi/\omega$；如果 $2\pi/\omega$ 是形如 J/K 的分数，并且 J、K 是互为素数的整数，则该正弦序列的周期为 J。

【例 1.1.1】　已知 $x(n)=\sin\left(\dfrac{4\pi}{11}n\right)$，求其周期。

解：　$\omega_0=\dfrac{4\pi}{11}$

则有　$\dfrac{2\pi}{\omega_0}=2\pi\dfrac{11}{4\pi}=\dfrac{11}{2}=\dfrac{J}{K}$

所以 N=11，即周期为 11。

为了验证运算结果，绘出 $x(n)=\sin\left(\dfrac{4\pi}{11}n\right)$ 序列，如图 1.1.6 所示，可以看出它是一个周期 N=11 的周期序列。

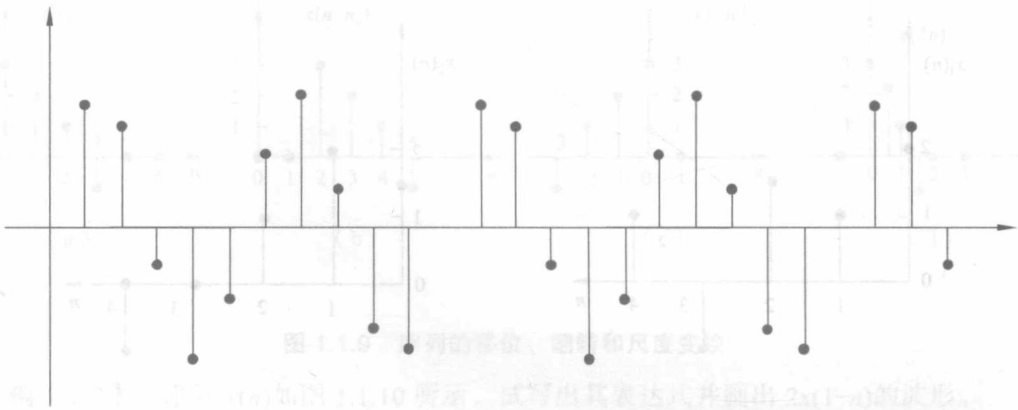

图 1.1.6 $x(n)=\sin\left(\dfrac{4\pi}{11}n\right)$序列

三、任意序列的通式

对于任意序列，常用单位脉冲序列的移位加权和来表示，如式（1.1.12）所示。其中 $x(m)$ 的值代表幅度，$\delta(n-m)$表征相位。

$$x(n)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}x(m)\delta(n-m) \tag{1.1.12}$$

【例 1.1.2】 已知序列 $x(n)=-\delta(n+2)+\delta(n+1)+2\delta(n)+1.5\delta(n-1)+0.5\delta(n-2)$，试画出其波形。

解：该序列的波形如图 1.1.7 所示。

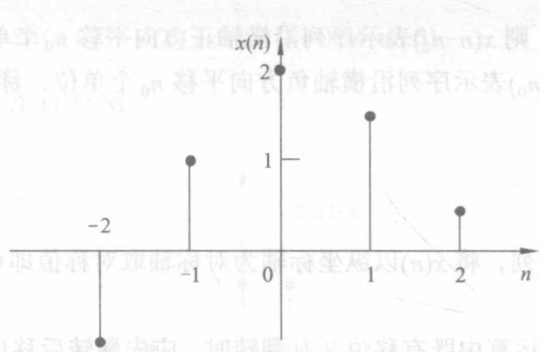

图 1.1.7 例 1.1.1 图

四、序列的运算

1. 加法和乘法

序列相加或相乘时，只需将横坐标相同的对应项直接相加或相乘即可，如图 1.1.8 所示。

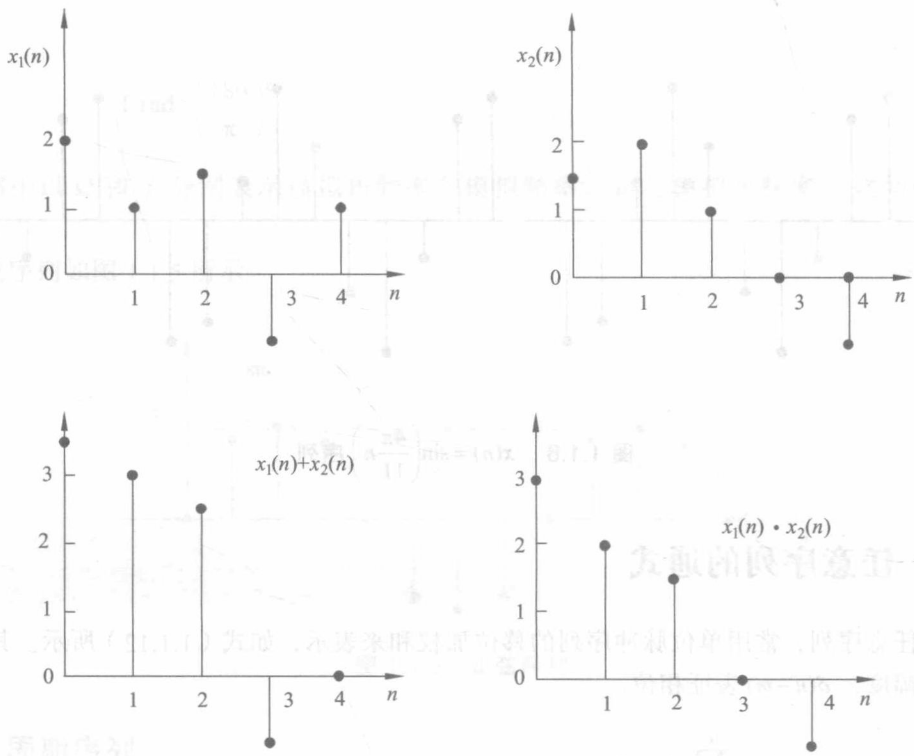

图 1.1.8　序列的加法和乘法

2. 移　位

设 n_0 为一个正整数，则 $x(n-n_0)$表示序列沿横轴正方向平移 n_0 个单位，如图 1.1.9（b）所示，称为延时序列；$x(n+n_0)$表示序列沿横轴负方向平移 n_0 个单位，称为超前序列。

3. 翻　转

$x(-n)$是 $x(n)$的翻转序列，将 $x(n)$以纵坐标轴为对称轴取对称值即可得到，如图 1.1.9（c）所示。

在此应注意，当序列运算中既有移位又有翻转时，应先翻转后移位。例如 $x(2-n)$，应当先将 $x(n)$翻转得到 $x(-n)$，再向正方向平移 2 个单位，得 $x[-(n-2)]$即 $x(2-n)$。

4. 尺度变换

$x(mn)$是 $x(n)$的尺度变换，是将 $x(n)$压缩了 m 倍后得到的。例如，$x(2n)$是将 $x(n)$压缩了 2 倍后得到的，如图 1.1.9（d）所示；$x(n/2)$是将 $x(n)$压缩了 1/2 倍即拉伸了 2 倍后得到的。此外应注意，压缩运算后非零点应删去，如图中的虚线所示。

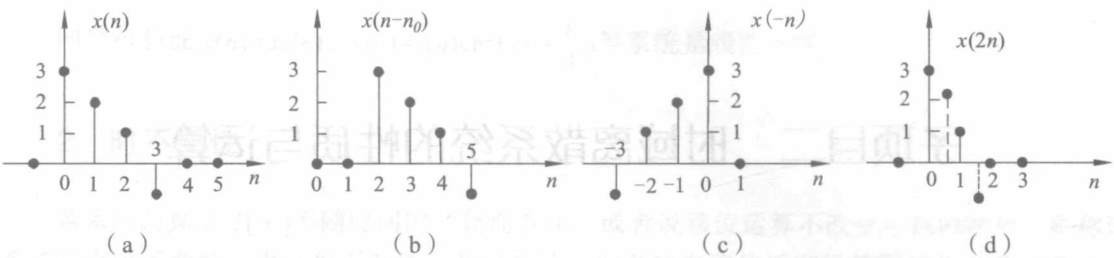

图 1.1.9　序列的移位、翻转和尺度变换

【例 1.1.3】　序列 $x(n)$如图 1.1.10 所示，试写出其表达式并画出 $2x(1-n)$的波形。

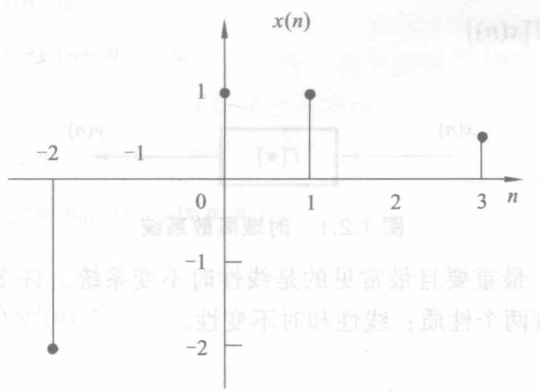

图 1.1.10　序列 $x(n)$的波形图

解：序列表达式为

$$x(n)=-2\delta(n+2)+\delta(n)+\delta(n-1)+0.5\delta(n-3)$$

$2x(1-n)$的波形如图 1.1.11 所示。

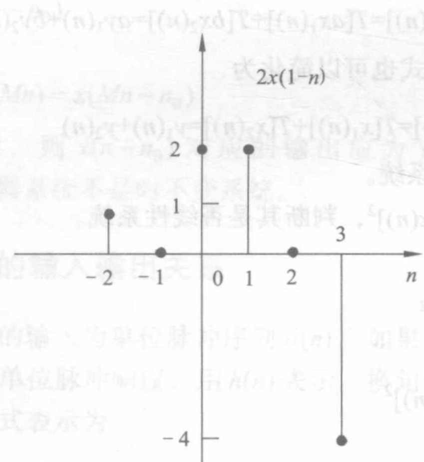

图 1.1.11　$2x(1-n)$的波形图

子项目二 时域离散系统的性质与运算

一、线性时不变系统

如前所述，系统代表一种或多种运算关系，该运算关系用 $T[\bullet]$表示，称为算子。如图 1.2.1 所示，系统的输入、输出序列分别用 $x(n)$、$y(n)$来表示，系统的运算关系即为

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

称 $y(n)$是 $x(n)$的变换。

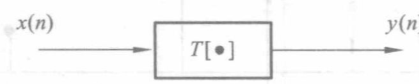

图 1.2.1 时域离散系统

在时域离散系统中，最重要且最常见的是线性时不变系统。许多物理过程都可以用这类系统来表征。该系统具有两个性质：线性和时不变性。

1. 线 性

所谓线性，即常值比例关系，如一次函数 $y=ax$（a 是常数），y 和 x 之间就满足线性关系。而 y 和 a 之间就不是线性关系。所谓线性系统，就是满足线性叠加原理的系统。设 $x_1(n)$、$x_2(n)$分别为系统的输入序列，与之对应的输出分别是 $y_1(n)$、$y_2(n)$，即 $y_1(n)$、$y_2(n)$分别是 $x_1(n)$、$x_2(n)$的变换，则满足线性叠加原理是指输入序列线性组合的变换等于变换的线性组合，如式(1.2.1)所示。

$$T[ax_1(n)+bx_2(n)]=T[ax_1(n)]+T[bx_2(n)]=ay_1(n)+by_2(n) \tag{1.2.1}$$

上式中，a，b 皆为常数。此公式也可以简化为

$$T[x_1(n)+x_2(n)]=T[x_1(n)]+T[x_2(n)]=y_1(n)+y_2(n)$$

本书中所讨论的皆为线性系统。

【例 1.2.1】 已知 $y(n)=[x(n)]^2$，判断其是否线性系统。

解： 线性组合的变换为

$$[x_1(n)+x_2(n)]^2$$

变换的线性组合为

$$[x_1(n)]^2+[x_2(n)]^2$$

显然

$$[x_1(n)+x_2(n)]^2\neq[x_1(n)]^2+[x_2(n)]^2$$

所以该系统为非线性系统。

同理可验证 $y(n)=ax(n)$、$y(n)=x(n)\cos(\omega n+\frac{\pi}{4})$等系统是线性系统。

2. 时不变性

若系统的算子 $T[\cdot]$不随时间的变化而变化，或者说移位运算不改变序列的波形，则称该系统具有时不变性，也称移不变性、非时变性。即系统先移位后变换等同于先变换后移位，则可证明其具有时不变性。

【例 1.2.2】 已知 $y(n)=nx(n)$，判断其是否为时不变系统。

解：先移位，后变换，得

$$x(n)\to x(n-n_0)$$

$$x(n-n_0)\to y'(n)=nx(n-n_0)$$

先变换，后移位，得

$$x(n)\to nx(n)$$

$$nx(n)\to y(n-n_0)=(n-n_0)x(n-n_0)$$

显然

$$y(n-n_0)\neq y'(n)$$

所以该系统是时变系统。

同理可验证 $y(n)=ax(n)$、$y(n)=[x(n)]^2$ 等系统是时不变系统。

【例 1.2.3】 设 $y(n)=x(Mn)$，试判断其是否为时不变系统。

解：如题目所示关系定义的系统通常被称为 M 阶压缩器。由上节序列的尺度变换性质可知，压缩器就是从 M 个样本中抛弃$(M-1)$个，即输出序列 $y(n)$是由输入序列 $x(n)$中每隔 M 个样本来构成的。下面通过举反例的方式证明该系统是时变系统：

设输入为

$$x_1(n)=x(n-n_0)$$

则

$$y_1(n)=x_1(Mn)=x(Mn-n_0)$$

如果系统是时不变的，则 $x(n-n_0)$ 对应的输出应为 $y(n-n_0)=x(Mn-Mn_0)$，显然 $y_1(n)\neq y(n-n_0)$，因而压缩器系统不是时不变系统。

3. 线性时不变系统的输入输出关系

假设某线性时不变系统的输入为单位脉冲序列 $\delta(n)$，如果该系统的初始状态为零，则此时系统的输出定义为系统的单位脉冲响应，用 $h(n)$ 表示。换句话说，单位取样响应即系统对于 $\delta(n)$ 的零状态响应。用公式表示为

$$y(n)=h(n)=T[\delta(n)]$$

单位取样响应 $h(n)$ 和模拟系统中的单位冲激响应 $h(t)$ 类似，都代表系统的时域特征。