



普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

数字信号处理 教学指导

胡学龙 吴镇扬



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

数字信号处理教学指导

胡学龙 吴镇扬

高等教育出版社

内容提要

本书是吴镇扬教授编写的普通高等教育“十五”国家级规划教材、江苏省高等学校精品教材《数字信号处理》配套的教学指导书。东南大学“数字信号处理”是首届国家精品课程,扬州大学“数字信号处理”为江苏省高等学校精品课程。本书配合国家和省级精品课程的建设,反映了编著者从事数字信号处理教学和科研的体会。本书基础理论与应用背景并重,特别注重培养对基本概念、基本方法和基本技能的掌握,是一本很实用的教学指导书,与教科书配套使用,将会起到良好的互补作用。

本教学指导书包括:教学要求、重点与难点、例题分析、教科书习题以及附录等。教学要求包括对本课程需要理解、掌握和灵活运用知识点的基本要求和教学内容。重点与难点、例题分析部分分章对数字信号处理的基本概念、基本方法和基本技能进行阐述,并通过例题和MATLAB程序强化学生对“三基”的掌握程度。附录包括了常用术语的中英文对照表、MATLAB常用信号处理库函数,这些对读者阅读本学科的外文文献、使用MATLAB解决实际问题都大有益处。作者还建立了配套的教学资源网站以便提供更多的教学资源为读者服务。

本书可供普通高等学校电气信息(含电子信息工程、通信工程、电子信息科学与技术、电子科学与技术 and 自动化)以及仪器仪表类专业使用,也可作为相关学科、专业研究生入学考试的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理教学指导 / 胡学龙, 吴镇扬 — 北京:
高等教育出版社, 2007 7

ISBN 978 - 7 - 04 - 021964 - 7

I. 数… II. ①胡…②吴… III. 数字信号 - 信
号处理 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. TN911 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 090855 号

策划编辑	陈思宇	责任编辑	曲文利	封面设计	刘晓翔
责任绘图	朱 静	版式设计	余 杨	责任校对	王 超
责任印制	宋克学				

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 100011
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京印刷集团有限责任公司印刷二厂

开 本 787×960 1/16
印 张 14 25
字 数 260 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 7 月第 1 版
印 次 2007 年 7 月第 1 次印刷
定 价 18 20 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

书 号 21964 - 00

前 言

数字信号处理是一门理论性和实践性均很强的本科生课程,同时也成为一些高校信息与通信工程等学科硕士研究生的入学考试课程,甚至在博士研究生入学专业入学考试中占有一定的比例。面对这样重要的学科基础课,学生普遍感到难学,教师觉得难教。要全面掌握本课程的内容,教师应该在讲解基本概念、基本原理的基础上,加强学生基本技能的训练。而学生应该掌握本课程的重点,了解课程的难点,完成大量的习题和 MATLAB 程序实现,提高分析、解决实际问题和创新的能力。一本富有启发性、实用性和可读性的教学指导书无疑是师生们所渴求的,它有助于克服教学中的畏难情绪,同时也是开展研究型教学、满足众多考生愿望所必需的。

本书是吴镇扬教授编写的普通高等教育“十五”国家级规划教材、江苏省高等学校精品教材《数字信号处理》(以下简称教科书)配套的教学指导书。东南大学“数字信号处理”是首届国家精品课程,扬州大学“数字信号处理”为江苏省高等学校精品课程。本书配合国家和省级精品课程的建设,反映了编著者从事数字信号处理教学和科研的体会。本书基础理论与应用背景并重,特别注重培养对基本概念、基本方法和基本技能的掌握,与教科书配套使用,将会起到良好的互补作用。

本教学指导书包括:教学要求、重点与难点、例题分析、教科书习题以及附录等。教学要求包括对本课程需要理解、掌握和灵活运用知识点的基本要求和教学内容。重点与难点、例题分析部分分章对数字信号处理的基本概念、基本方法和基本技能进行阐述,并通过例题和 MATLAB 程序强化学生对“三基”的掌握程度。附录包括了常用术语的中英文对照表、MATLAB 常用信号处理库函数,这些对读者阅读本学科的外文文献、使用 MATLAB 解决问题都大有益处。编著者还建立了配套的教学资源网站以使本书提供更多的教学资源为读者服务。

编著者主持的“数字信号处理立体化”教材建设项目被列为“高等教育百门精品课程教学建设计划”的立项课题。作为立体化教材的重要组成部分,本指导书起到与教科书互补、提高实际应用能力的作用。编写工作还得到国家精品课程、江苏省精品课程、扬州大学和该校信息学院精品课程建设基金的资助。胡学龙教授编写了绪论、第1~4章及附录,并负责全书的统稿工作。吴镇扬教授编写了第5~6章。

在编写过程中,得到编著者所在学校和学院有关领导和课程组建设成员的支持。编著者的研究生邓小颖、杨飞然、高燕、程茜等协助完成了一些工作。对

他们的支持和帮助,编著者特此表示感谢。

本书可供普通高等学校电气信息(含电子信息工程、通信工程、电子信息科学与技术、电子科学与技术和自动化)以及仪器仪表类专业使用,也可作为相关学科、专业研究生入学考试的参考书籍。我们希望本书有较大的读者覆盖面,教师、学生和工程技术人员都能够从中有所收益。这一愿望自然是良好的,但由于编写一本适用于研究型 and 工程应用型的教学指导书并非易事,加之编著者水平有限,本书难免有一些不足和错误之处。我们殷切希望读者对本书提出改进意见,以便于今后编写出质量更高、使用效果更好的教学指导书。编著者的电子邮件地址是:yzudsp@126.com(扬州大学),zhenyang@seu.edu.cn(东南大学)。有关本教学指导书的较新信息,我们将在两校的精品课程网站发布。

编著者

2007年3月

目 录

绪论	1
0.1 概述	1
0.2 教学要求	1
0.3 重点内容与难点分析	2
0.3.1 信号与数字信号处理	2
0.3.2 为什么要采用数字信号处理	3
0.3.3 数字信号处理的发展与应用	3
0.3.4 本课程的主要内容	4
0.3.5 现代数字信号处理简介	4
0.4 思考题	4
第1章 离散时间信号与系统	5
1.1 概述	5
1.2 教学要求	5
1.3 重点内容与难点分析	6
1.3.1 离散时间信号	6
1.3.2 采样	13
1.3.3 离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)	16
1.3.4 z 变换	19
1.3.5 离散时间系统	22
1.3.6 系统的频率响应与系统函数	25
1.4 题型分析与例题选解	27
1.5 思考题	43
第2章 离散傅里叶变换及其快速算法	44
2.1 概述	44
2.2 教学要求	44
2.3 重点内容与难点分析	45
2.3.1 离散傅里叶级数(DFS)	45
2.3.2 离散傅里叶变换(DFT)	47

2.3.3 利用 DFT 做连续信号的频谱分析	50
2.3.4 快速傅里叶变换(FFT)	52
2.3.5 关于 FFT 应用中的几个问题	60
2.4 题型分析与例题选解	65
2.5 思考题	82
第 3 章 无限长单位脉冲响应(IIR)滤波器的设计方法	83
3.1 概述	83
3.2 教学要求	83
3.3 重点内容与难点分析	84
3.3.1 数字滤波器的一般概念	84
3.3.2 根据模拟滤波器设计 IIR 滤波器	88
3.3.3 常用模拟低通滤波器特性	94
3.3.4 从模拟滤波器低通原型到各种数字滤波器的频率变换	100
3.3.5 从低通数字滤波器到各种数字滤波器的频率变换	103
3.3.6 IIR DF 的最优化设计	104
3.4 题型分析与例题选解	106
3.5 思考题	116
第 4 章 有限长单位脉冲响应(FIR)滤波器的设计方法	118
4.1 概述	118
4.2 教学要求	118
4.3 重点内容与难点分析	119
4.3.1 FIR 滤波器的系统函数与零极点分布	119
4.3.2 线性相位滤波器的意义	119
4.3.3 线性相位 FIR 滤波器的特点	119
4.3.4 窗口设计法	122
4.3.5 频率采样设计法	124
4.3.6 FIR 滤波器的最优化设计	129
4.3.7 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	133
4.4 题型分析与例题选解	134
4.5 思考题	146
第 5 章 数字信号处理系统的实现	148
5.1 概述	148

5.2 教学要求	148
5.3 重点内容与难点分析	149
5.3.1 数字滤波器的结构	149
5.3.2 量化与量化误差	154
5.3.3 有限字长运算对数字信号处理系统的影响	156
5.3.4 极限环振荡	158
5.3.5 系数量化对数字滤波器的影响	159
5.3.6 数字信号处理硬件	159
5.4 题型分析与例题选解	160
5.5 思考题	175
第 6 章 多采样率信号处理	177
6.1 概述	177
6.2 教学要求	177
6.3 重点内容与难点分析	178
6.3.1 采样率降低——整数 M 倍抽取	178
6.3.2 采样率提高——整数 L 倍内插	179
6.3.3 抽取与内插的 FIR 结构	181
6.3.4 过采样技术	182
6.3.5 正交镜像滤波器组(QMF)	184
6.3.6 树状结构滤波器组	186
6.4 题型分析与例题选解	188
6.5 思考题	201
附录	202
附录 1 常用术语的中英文对照表	202
附录 2 信号处理常用的 MATLAB 库函数	212
参考文献	217

绪 论

0.1 概述

绪论部分对教科书起到一个导读的作用,简略介绍了数字信号及其处理的基本概念,数字信号处理的历史、现状和未来的发展趋势。数字信号处理的理论、技术和应用范围很广,代表了信号处理的主流方向,本课程是信号和信息处理课程群中十分重要的组成部分,基础性很强。绪论对本课程讨论的范围做了描述。通过这些内容的介绍,读者会了解本课程在信息技术中的地位和作用,引起学习的兴趣,增强学好的信心。

0.2 教学要求

1. 教学基本要求

对于本章,读者可以根据自己在“信号与线性系统”、“数字电子技术基础”等课程中掌握的程度,灵活对待。

了解:数字信号处理的发展,现代数字信号处理。

理解:数字信号处理的应用,数字信号处理的实现方法。

掌握:数字信号处理系统的优点。

2. 教学内容

- (1) 数字信号处理的发展简史。
- (2) 数字信号处理系统的优点。
- (3) 数字信号处理的应用。
- (4) 数字信号处理的实现方法。
- (5) 现代数字信号处理简介。

0.3 重点内容与难点分析

0.3.1 信号与数字信号处理

1. 信号的分类(classification)

(1) 按连续性分:模拟信号、离散时间信号、数字信号。

模拟信号(analog signal):又称连续信号(continuous signal)或连续时间信号(continuous time signal),在时间和幅度上均取连续值(实数)的信号。

离散时间信号(discrete time signal):在时间上取离散值(整数),幅度上取连续值的信号。

数字信号(digital signal):时间上和幅度上都取离散值的信号。如果幅度的量化精度足够高,数字信号等同于离散时间信号。

(2) 按确定性分:确定性信号(deterministic signal)、随机信号(random signal)。

本课程主要研究前者,而后者一般在“随机信号处理”课程中学习或在研究生阶段学习。

2. 模拟信号向数字信号的转换(A/D 转换)

这一部分内容在“数字电子技术基础”课程中有所涉及。A/D 转换一般要经过采样(sampling)、保持(holding)、量化(quantizing)及编码(coding)4个过程。在实际电路中,采样和保持、量化和编码往往都是在转换过程中同时实现的。教科书的第1章和第5章主要讨论了其中两个过程:

(1) 采样:由模拟信号转换成离散时间信号。将采样电路每次得到的模拟信号转换为离散时间信号都需要一定的时间,为了给后续的量化编码过程提供一个稳定值,每次取得的模拟信号必须通过保持电路保持一段时间。

(2) 量化:由离散时间信号转换成数字信号。在通信系统或存储系统中,为了高效或可靠地传输或存储信号,量化后的信号可能需要编码。

逆过程是数字信号向模拟信号的转换(D/A 转换)。相对于 A/D 转换,D/A 转换过程比较简单,只要通过一个模拟低通滤波器就可以得到平滑的模拟信号,但数学上要用到插值函数,第1章将对此进行分析。

3. 数字信号处理的含义

根据出现的场合,“数字信号处理”有两个密切联系但有所区别的含义。

(1) 数字信号处理理论与技术(Digital Signal Processing, DSP)。本课程主要研究的内容。

(2) 数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)。主要研究数字信号处理的硬件实现技术。参见第5章第6节。

0.3.2 为什么要采用数字信号处理

1. 数字信号处理系统的优点

数字信号与模拟信号的比较:

- (1) 优势方面:精度、灵活性、线性相位、多维处理等。
- (2) 劣势方面:复杂性、高频特性、功耗和成本等。

2. 数字信号处理系统不能全部取代模拟信号处理系统

数字信号处理系统在现代信号处理中的作用越来越大,实际信息处理系统往往是两者的混合,是两种系统的有机结合。

0.3.3 数字信号处理的发展与应用

数字信号处理的发展与应用的需求是密切相关的。了解数字信号处理的发展简史有助于把握数字信号处理发展的方向。

1. 由简单运算走向复杂运算

全并行乘法器在运算速度上和运算精度上均为复杂的数字信号处理算法提供了先决条件。

2. 由低频走向高频

例如:早期主要研究数字音频技术,而现在大众更关注数字视频技术。

3. 由一维走向多维

音频信号是典型的随时间变化的一维信号(1-D signal),图像是典型的随空间变化的二维信号(2-D signal),而数字视频是典型的随时间和空间同时变

化的三维信号(3-D signal)。

数字信号处理的实现方法有软件实现和硬件实现两种。

0.3.4 本课程的主要内容

以确定性信号为主要研究对象。离散傅里叶变换及其快速傅里叶变换(FFT)和数字滤波器是本课程的主要内容。

0.3.5 现代数字信号处理简介

1. 多采样率信号处理与小波变换

教科书第6章做了介绍。

2. 最优滤波理论、自适应滤波、二维滤波

后续课程或研究生课程将介绍。

3. 数字谱分析

后续课程或研究生课程将介绍。

0.4 思考题

1. 讨论模拟信号、离散时间信号和数字信号的联系和差异。
2. 说明采样信号与采样保持信号的区别,保持电路的作用。
3. 说明数字信号处理与信号的数字处理的联系与区别。
4. 分别说出 MP3、数码照相机、数码摄像机、移动电话等常用信息设备用到哪些数字信号处理技术。
5. 说出数字信号处理软件实现和硬件实现各自的优缺点。

第1章 离散时间信号与系统

1.1 概述

本章内容基本上是“信号与线性系统”中已经建立的离散时间信号与系统概念的复习,在各校“数字信号处理”课程的研究生入学考试中占有一定的分量。作为重点复习内容,在概念上需要明白本章在整个数字信号处理中的地位,巩固和深化有关概念,进一步提高运用概念解题的能力。注意其承前启后的作用,以便对前后概念进行比较,加强相关概念的联系。学习本章需要解决以下一些问题:

- (1) 如何用数学表达式和 MATLAB 表示离散时间信号。
- (2) 如何选择一个数字化系统的采样频率。
- (3) 如何从采样后的信号恢复原始信号。
- (4) 离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)和 z 变换在离散时间信号与系统分析中的意义与作用。
- (5) 如何用 MATLAB 完成 DTFT 和 z 变换。
- (6) 如何判断一个离散系统的线性、因果性、稳定性。
- (7) 线性时不变系统与线性卷积的关系。
- (8) 如何用 MATLAB 求解线性常系数差分方程。
- (9) 如何用运算结构实现离散系统。
- (10) 如何仿真离散系统的频率特性和系统函数。
- (11) 数字滤波器的分类。

1.2 教学要求

1. 教学基本要求

对于本章,读者可以根据自己在“信号与线性系统”课程中掌握的程度,灵活对待。

理解:采样和恢复原理,非因果系统的实现原理。

掌握:离散时间信号的表示,采样定理,DTFT 的定义, z 变换的定义,线性时

不变系统的线性卷积,系统函数,系统的频率响应。

灵活运用:离散时间信号的傅里叶变换与 z 变换。

2. 教学内容

(1) 离散时间信号。

典型序列,序列的运算,序列的分类。

(2) 采样。

模拟信号的采样,采样定理,采样后信号的恢复。

(3) 离散时间信号的傅里叶变换与 z 变换。

DTFT, z 变换, z 变换与DTFT的关系。

(4) 离散时间系统。

线性时不变系统,系统的稳定性与因果性,系统的差分方程及其求解。

(5) 系统的频率响应与系统函数。

系统的系统函数,系统的频率响应,IIR系统与FIR系统。

1.3 重点内容与难点分析

1.3.1 离散时间信号

1. 几种常用的典型序列

注意三种基本信号的作用及以下几点:

(1) 离散时间信号的数学表示和MATLAB实现都是十分重要的。前者主要用于信号的数学分析,而后者便于编制信号分析的计算机程序。读者要注意两者的联系和区别。两者的区别如表1.1所示。

表 1.1 信号的不同表示方法的差异

表示方法	序号的区间	编址约定
数学表示	无限的整数变量	从0开始
MATLAB	有限的整数变量	从1开始

(2) 典型序列及其MATLAB实现。

典型序列如图1.1所示。用MATLAB实现典型序列需要解决两个问题:无限的序号如何变成有限的序号和如何确定编址约定。由于MATLAB只能表示

有限序号域,假设序列的长度为 N ,所以需要将序号域限制在 $0 \sim (N-1)$ 范围内。若序号从 0 开始编制,而信号向量的首地址为 1,为了与数学表达式一致,输出时可重新将向量的首地址 1 映射为序号变量的 0。

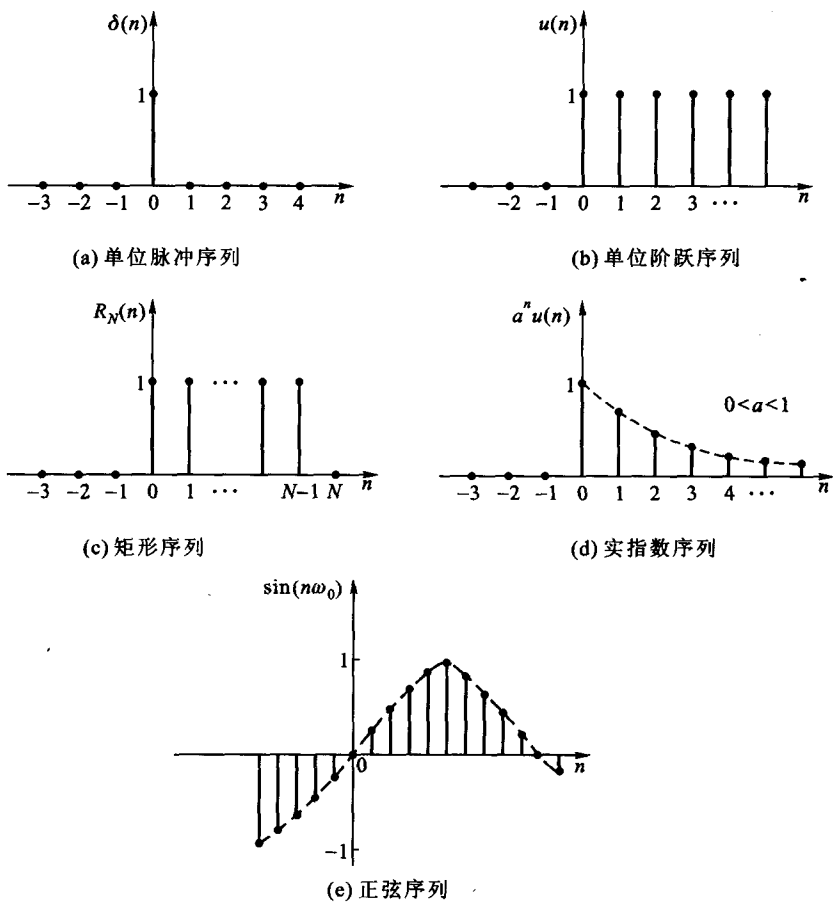


图 1.1 典型序列

① 单位脉冲序列(unit impulse sequence 或 unit sample sequence)。

表达式:

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

筛选性:

$$\delta(n) * f(n) = f(n) \quad (1.2)$$

MATLAB 实现:

$x = \text{zeros}(1, N);$

$x(1) = 1;$

或

$x = [1, \text{zeros}(1, N-1)];$

② 单位阶跃函数(unit step sequence)。

表达式:

$$u(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

与 $\delta(n)$ 的关系:

$$u(n) = \sum_{m=0}^{\infty} \delta(n-m) \quad (1.4)$$

MATLAB 实现:

$x = \text{ones}(1, N);$

③ 矩形序列(sequence of rectangular pulses)。

表达式:

$$R_N(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & n < 0, n \geq N \end{cases} \quad (1.5)$$

与 $u(n)$ 之间的关系:

$$R_N(n) = u(n) - u(n-N) \quad (1.6)$$

MATLAB 实现:

为避免矩形的宽度与序列的长度混淆,设矩形的宽度为 w 。

$x = [\text{ones}(1, w) \quad \text{zero}(1, N-w)];$

④ 实指数序列(real exponential sequence)。

表达式:

$$x(n) = a^n u(n) \quad (1.7)$$

MATLAB 实现:

$n = 0:N-1;$

$x = a.^n;$

⑤ 正弦序列(sequence of sinusoid values)。

表达式:

$$x(n) = \sin(n\omega_0) \quad (1.8)$$

MATLAB 实现:

$n = 0:N-1;$

$x = \sin(w * n);$

⑥ 复指数序列(complex exponential sequence)。

表达式:

$$x(n) = Ae^{(\alpha + j\omega_0)n} = Ae^{\alpha n} [\cos(\omega_0 n) + j\sin(\omega_0 n)] \quad (1.9)$$

MATLAB 实现:

$n = 0:N-1;$

$x = \exp((\alpha + j\omega) * n);$

(3) 典型序列与一般序列之间的关系。

对系统的响应往往采用典型信号测试,这些信号可以反映实际信号的某些特性。

$\delta(n)$ 是最基本的信号。任一序列都可以表示成 $\delta(n)$ 移位的加权和,即

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)\delta(n-m) \quad (1.10)$$

(4) 序列的分类。

从不同的角度讨论,可以将信号序列分成以下不同类别:

① 从序列的周期性分——周期序列和非周期序列。

设 r 为任意整数, N 为正实整数,如果信号 $x(n)$ 满足下面的关系

$$x(n) = x(n+rN) \quad (1.11)$$

则称 $x(n)$ 为周期序列,并称满足上述关系的最小 N 为基本周期。如果找不到任何一个满足上述关系的 N 值,则称 $x(n)$ 为非周期序列。

② 从序列的持续时间分——有限长序列和无限长序列。

如果在超出有限序域区间的 n 值处,一个离散序列等于0,则称该序列为有限长序列(finite sequence);否则,序列为无限长序列(infinite sequence)。

③ 按照非零值存在的区域分——右边序列、左边序列和双边序列。

右边序列:设 n_1 为一整数,右边序列指 $n < n_1$ 时 $x(n) = 0$ 的序列。

左边序列:设 n_2 为一整数,左边序列指 $n > n_2$ 时 $x(n) = 0$ 的序列。

双边序列:可以看成是一个左边序列和一个右边序列和的形式。

④ 从序列的对称性分——对称序列(symmetry sequence)和非对称序列(anti-symmetry sequence)。

一个非对称序列 $x(n)$ 可以分解成一个偶对称序列 $x_e(n)$ 和一个奇对称序列 $x_o(n)$ 和的形式。

⑤ 从序列的因果性分——因果序列、非因果序列和反因果序列。

因果序列(causal sequence):指 $n < 0$ 时 $x(n) = 0$ 的序列。

非因果序列(non-causal sequence):指 $n < 0$ 时存在 $x(n) \neq 0$ 的序列。

反因果序列(anti-causal sequence):指 $n > 0$ 时 $x(n) = 0$ 的序列。

⑥ 从能量的有限性分——能量序列和功率序列。

信号的能量定义: