



高等院校自动化新编系列教材

数字信号处理

SHUZI XINHAO CHULI

王凤文 舒冬梅 赵宏才 编著

惠晓威 主审



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

TN911.72
125

数字信号处理

编著 王凤文 舒冬梅 赵宏才
主审 惠晓威

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书分为上下两篇:上篇为数字信号处理技术的理论基础,包括连续时间信号分析、连续时间系统分析、离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的频域分析、离散时间信号与系统的数字频域分析、IIR 数字滤波器设计和 FIR 数字滤波器设计七章内容;下篇为数字信号处理技术的实现与应用,包括 TMS320C54x 数字信号处理器、TMS320C54x 的指令系统、DSP 应用程序设计和 DSP 接口设计与应用实例。

书中给出了大量的习题、例题和 MATLAB 仿真实例,在部分章的后面还给出了建议实验内容和实验的设计思路。

本书适合自动化学科《数字信号处理》课程的选用教材。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/王凤文,舒冬梅,赵宏才编著. —北京:北京邮电大学出版社,2005

ISBN 7-5635-1121-0

I. 数... II. ①王...②舒...③赵... III. 数字信号—信号处理—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157118 号

出 版 者: 北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号) 邮编:100876

发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱:publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 20.25

字 数: 478 千字

印 数: 3 000 册

版 次: 2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1121-0/TP·205

定价: 28.00 元

如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系

高等院校自动化新编系列教材

编委会

主 任 汪晋宽

副主任 金海明 罗云林 张美金 崔光照

委 员 (按姓氏笔划排名)

于丁文 王凤文 王建国 马淑华 石云霞

齐世清 任彦硕 张家生 张 健 杨建忠

柳明丽 罗长杰 金 伟 赵宏才 赵一丁

顾德英 舒冬梅 藏小杰 郑安平

秘 书 顾德英(兼) 马淑华(兼)

编写说明

一本好的教材和一本好的书不同,一本好的书在于其内容的吸引力和情节的魅力,而一本好的教材不仅要对所介绍的科学知识表达清楚、准确,更重要的是在写作手法上能站在读者的立场上,帮助读者对教材的理解,形成知识链条,进而学会举一反三。基于这种考虑在充分理解自动化专业培养目标和人才需求的前提下,我们规划了这套《高等院校自动化新编系列教材》。

本套系列教材共包括 21 册,在内容取舍划分上,认真分析了各门课程内容的相互关系和衔接,避免了不必要的重复,增加了一些新的内容。在知识结构设计上,保证专业知识完整性的同时,考虑了学生综合能力的培养,并为学生继续学习留有空间。在课程体系规划上,注意了前后知识的贯通,尽可能做到先开的课程为后续的课程提供基础和帮助,后续的课程为先开的课程提供应用的案例,以便于学生对自动化专业的理解。

《高等院校自动化新编系列教材》编委会

2005 年 8 月

前 言

数字信号处理技术是现今发展最为迅速的学科之一,数字信号处理的理论正在逐步走向成熟,内容也在逐步的扩展。特别是进入到 21 世纪以来,随着超大规模集成电路设计、制造技术和计算机技术的飞速发展,数字信号处理芯片(DSP)的设计和制造技术极速发展,一些性价比极高的 DSP 芯片纷纷推出,使得其应用领域迅速扩大,由原来主要的信号处理、通信、航空、航天、军事应用领域推广到自动化(自适应控制、机器人控制、电机控制、电力线监控、发动机控制等)、仪器仪表、家用电器、生物医学、医疗设备、汽车装备等领域。

按照传统的专业课程设置,《数字信号处理》一课过去在自动化专业少有开设。现在,为了适应新的技术发展的需要,为了培养面向 21 世纪、掌握最新自动化专业技术人才的需要,很多院校已经将《数字信号处理》课程列为自动化专业的专业必修课程。

基于过去专业分工的《数字信号处理》教材很多,基于专业应用的《DSP 原理和应用》书籍也不少,其中不乏许多经典之作。但以我们多年的教学经验和体会,我们注意到:(1) 基于过去专业分工的《数字信号处理》教材不包含《信号与系统分析》的基本内容,在过去传统的分工中《信号与系统分析》是《数字信号处理》的前续课程,而这些内容是学习《数字信号处理》理论的基础。(2) 同样,基于专业应用的《DSP 原理和应用》大多为适合工程技术人员使用的技术书籍,一些专为教学而编写的教材也是为“电子信息类学科”而量身定制,少有包括《数字信号处理》理论部分的,这些教材适合于前期开设了《信号与系统分析》和《数字信号处理》课程的专业选用。

基于以上的考虑,结合自动化专业课程设置的特点,我们提出了编写一本包括《信号与系统分析》的基本内容、《数字信号处理》的基础理论和《DSP 原理和应用》专业技术应用内容在内,各部分内容有机结合,兼顾数字信号处理技术的理论和应用,突出实用,适合自动化学科的《数字信号处理》教材的构想,这一构想得到了校内外教授专家和专业教师同行的充分肯定和支持。按照这一构想我们制定了写作大纲,编写了讲稿,并按照编写大纲的内容在近

两届的自动化类专业组织了教学,取得了良好的教学效果。教学改革的初步成效鼓励我们按照这一构想组织成书。

本书分为上下两篇:上篇为数字信号处理技术的理论基础,包括连续时间信号分析、连续时间系统分析、离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的频域分析、离散时间信号与系统的数字频域分析、IIR 数字滤波器设计和 FIR 数字滤波器设计七章内容;下篇为数字信号处理技术的实现与应用,包括 TMS320C54x 数字信号处理器、TMS320C54x 的指令系统、DSP 应用程序设计和 DSP 接口设计与应用实例。在下篇中考虑到目前高校的实验条件,没有选择技术最新的 DSP 芯片而选择了普遍应用的 TI 公司 TMS320C54x 芯片。建议选用本教材的教师在讲授这部分内容时,适当增加一些反映最新 DSP 芯片技术的内容,以使学生了解和掌握数字信号处理的最新技术。

本书中给出了大量的习题、例题和 MATLAB 仿真实例,在部分章的后面还给出了建议实验内容和实验的设计思路,这些内容在构成本书特色之一的同时,相信会给读者带来学习上的诸多便利。

本书适合自动化学科《数字信号处理》课程的选用教材。

本书由王凤文(东北大学)、舒冬梅(东北大学)和赵宏才(青岛理工大学)主持编写,参加编写工作的还有青岛理工大学石云霞、辽宁科技学院柳明丽、河北科技师范学院王宽、辽宁阜新自来水公司的牛波、蒋七一高级工程师。全书由舒冬梅、王凤文统稿,由惠晓威教授审阅。

在本书的编写过程中,得到了东北大学、青岛理工大学、辽宁信息学院、郑州轻工学院和辽宁阜新自来水公司领导 and 同志们的大力鼓励和支持,借此机会表示作者深深的谢意!

虽然我们尽了很大的努力,但由于水平有限,书中肯定存在着不足,衷心希望阅读本书的读者和同行提出宝贵的意见,以便我们不断改进和完善。谢谢!

编 者

2005 年 12 月于东北大学

目 录

上 篇 数字信号处理技术的理论基础

第 1 章 连续时间信号分析

1.1 概述	3
1.2 连续时间信号的时域分析	3
1.2.1 信号的分类	3
1.2.2 典型信号	5
1.2.3 信号的基本运算	7
1.2.4 奇异信号	12
1.2.5 信号的分解	15
1.2.6 线性相关	16
1.3 连续时间信号的频域分析	17
1.3.1 周期信号的频谱	17
1.3.2 非周期信号的频谱	21
1.3.3 傅里叶变换的基本性质	24
1.3.4 周期信号的傅里叶变换	26
1.4 抽样及抽样定理	27
1.4.1 时域抽样	27
1.4.2 频域抽样	30
1.5 连续时间信号的 s 域分析	31
1.5.1 双边拉氏变换及其收敛域	31
1.5.2 单边拉氏变换及其基本性质	32
1.5.3 单边拉氏反变换	34
1.5.4 由 $X(s)$ 的零、极点分布确定信号的时域特性	37
1.5.5 单边拉氏变换与傅里叶变换的关系	38
习题和实验指导	39

第 2 章 连续时间系统分析

2.1 概述	43
2.1.1 信号与系统的关系	43
2.1.2 系统分析	43
2.2 线性时不变连续时间系统的时域分析	44

2.2.1 线性时不变连续时间系统·····	44
2.2.2 线性时不变连续时间系统的响应·····	46
2.3 线性时不变连续时间系统的 s 域分析·····	52
2.3.1 用单边拉氏变换求系统的响应·····	52
2.3.2 系统函数·····	53
2.4 线性时不变连续时间系统的频域分析·····	56
2.4.1 系统的频率响应特性·····	56
2.4.2 系统的滤波特性·····	59
2.5 无失真传输·····	63
2.5.1 失真的概念·····	63
2.5.2 无失真传输的条件·····	64
习题和实验指导·····	65
第3章 离散时间信号与系统时域分析	
3.1 概述·····	68
3.1.1 数字信号处理系统的基本组成·····	68
3.1.2 数字信号处理的主要特点·····	69
3.1.3 数字信号处理的学科概貌·····	70
3.2 离散时间信号的时域分析·····	71
3.2.1 离散时间信号——序列·····	71
3.2.2 序列的基本运算·····	71
3.2.3 典型序列·····	76
3.2.4 序列的周期性·····	80
3.2.5 共轭对称序列和共轭反对称序列·····	81
3.3 线性移不变离散时间系统时域分析·····	82
3.3.1 线性移不变离散时间系统·····	82
3.3.2 单位抽样响应·····	84
习题和实验指导·····	88
第4章 离散时间信号与系统频域分析	
4.1 z 变换·····	91
4.1.1 z 变换的定义及其收敛域·····	91
4.1.2 z 变换的基本性质和定理·····	96
4.1.3 z 反变换·····	99
4.2 离散时间信号的频域分析·····	104
4.2.1 序列的 z 变换与连续时间信号的拉氏变换之间的关系·····	104
4.2.2 序列的傅里叶变换·····	106
4.3 线性移不变离散时间系统的 z 域分析·····	108
4.3.1 系统函数·····	108
4.3.2 IIR 系统与 FIR 系统·····	109
4.3.3 系统响应的 z 域求解·····	110

4.4 线性移不变离散时间系统的频域分析	112
4.4.1 系统的频率响应特性	112
4.4.2 全通系统与最小相位系统	116
习题和实验指导	119
第5章 离散时间信号与系统数字频域分析	
5.1 时域-频域的周期-离散对应关系	122
5.1.1 连续时间非周期信号的傅里叶变换	122
5.1.2 连续时间周期信号的傅里叶级数	122
5.1.3 非周期序列的傅里叶变换	123
5.1.4 周期序列的离散傅里叶级数	123
5.2 离散傅里叶级数	124
5.3 离散傅里叶变换及其性质	126
5.3.1 离散傅里叶变换	126
5.3.2 DFT 与 DTFT 及 z 变换的关系	127
5.3.3 离散傅里叶变换的性质	129
5.4 DFT 的快速算法——快速傅里叶变换	134
5.4.1 减少 DFT 运算量的基本途径	135
5.4.2 按时间抽取的基-2 FFT 算法	136
5.4.3 按频率抽取的基-2 FFT 算法	141
5.4.4 离散傅里叶反变换的快速算法	143
5.5 用 DFT 计算线性卷积和	144
5.5.1 圆周卷积和与线性卷积和的关系	144
5.5.2 线性卷积和的分段算法	146
5.6 用 DFT 对连续时间信号进行频谱分析	148
习题和实验指导	151
第6章 IIR 数字滤波器设计	
6.1 数字滤波器设计的基本概念	155
6.1.1 数字滤波器设计的主要内容和方法	155
6.1.2 数字滤波器的技术指标要求	155
6.2 IIR 数字滤波器的基本结构	157
6.2.1 信号流图与系统函数、差分方程的转换	157
6.2.2 直接型结构	158
6.2.3 级联型结构	161
6.2.4 并联型结构	163
6.3 模拟滤波器设计	165
6.3.1 模拟滤波器设计的基本概念	165
6.3.2 设计 IIR 滤波器的常用 Matlab 函数	166
6.3.3 模拟低通滤波器设计	167
6.3.4 模拟高通、带通和带阻滤波器设计	173

6.4 数字滤波器设计	179
6.4.1 模拟滤波器到数字滤波器的映射	179
6.4.2 数字滤波器的间接设计	183
习题和实验指导	186
第7章 FIR 数字滤波器设计	
7.1 FIR 数字滤波器的基本结构	188
7.1.1 直接型结构	189
7.1.2 级联型结构	189
7.1.3 频率抽样型结构	190
7.2 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点	193
7.2.1 FIR 数字滤波器的线性相位条件	193
7.2.2 线性相位 FIR 数字滤波器的幅频特性	195
7.2.3 线性相位 FIR 数字滤波器的零点分布	197
7.2.4 线性相位结构	198
7.3 线性相位 FIR 数字滤波器设计	199
7.3.1 窗函数法	199
7.3.2 常用窗函数	203
7.3.3 窗函数法的设计步骤	206
7.4 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	209
习题和实验指导	210

下 篇 数字信号处理技术的实现与应用

第8章 TMS320C54x 数字信号处理器

8.1 DSP 芯片概述	213
8.1.1 DSP 芯片的主要特点	213
8.1.2 DSP 芯片的分类	215
8.1.3 DSP 芯片的发展历程和发展趋势	216
8.2 TMS320C54x DSP 芯片	217
8.2.1 TMS320C 系列 DSP 芯片	217
8.2.2 TMS320C54x 芯片的特点	218
8.3 TMS320C54x 芯片的组成结构	219
8.4 TMS320C54x 芯片的总线结构	220
8.5 TMS320C54x 芯片的中央处理器(CPU)	221
8.5.1 TMS320C54xCPU 的基本组成	221
8.5.2 算术逻辑运算单元(ALU)	221
8.5.3 累加器	222
8.5.4 桶形移位寄存器	222
8.5.5 乘法器/加法器	223

8.5.6 比较、选择、存储单元(CSSU)·····	224
8.5.7 指数编码器 ·····	225
8.5.8 CPU 状态控制寄存器 ·····	225
8.6 TMS320C54x 芯片的存储空间结构 ·····	227
8.6.1 存储器空间的总体结构 ·····	227
8.6.2 程序存储空间 ·····	229
8.6.3 数据存储空间 ·····	230
8.6.4 特殊功能寄存器 ·····	230
8.6.5 I/O 存储空间 ·····	231
8.7 TMS320C54x 芯片的引脚 ·····	231
8.7.1 TMS320C54x 芯片的引脚分布 ·····	231
8.7.2 TMS320C5402 芯片各引脚的功能·····	232
8.8 TMS320C54x 芯片的片内外设电路 ·····	236
8.8.1 通用 I/O 引脚 ·····	237
8.8.2 主机接口 HPI ·····	237
8.8.3 定时器 ·····	238
8.8.4 时钟发生器 ·····	239
8.8.5 软件可编程等待状态发生器 ·····	240
8.8.6 串行通信接口 ·····	240
习题与思考·····	244
第 9 章 TMS320C54x 的指令系统	
9.1 TMS320C54x 指令的数据寻址方式 ·····	245
9.1.1 立即寻址 ·····	245
9.1.2 绝对寻址 ·····	246
9.1.3 累加器寻址 ·····	247
9.1.4 直接寻址 ·····	247
9.1.5 间接寻址 ·····	248
9.1.6 存储器映射寄存器寻址 ·····	253
9.1.7 堆栈寻址 ·····	253
9.2 TMS320C54x 指令系统概述 ·····	254
9.2.1 汇编语言源程序格式 ·····	254
9.2.2 指令系统中规定的符号和缩写 ·····	255
9.3 TMS320C54x 的指令系统 ·····	257
9.3.1 算术运算指令 ·····	257
9.3.2 逻辑运算指令 ·····	265
9.3.2 程序控制指令 ·····	269
9.3.4 加载和存储指令 ·····	273
习题与思考·····	279

第 10 章 DSP 应用程序设计

10.1 DSP 应用程序设计的开发过程	280
10.1.1 基于 TMS320C54x 芯片的应用程序设计开发流程	280
10.1.2 软件(代码)调试工具简介	282
10.2 DSP 集成开发环境 CCS 及其使用	283
10.2.1 CCS 的主要功能和特点	283
10.2.2 CCS 的安装及设置	284
10.2.3 CCS 集成开发环境应用	285
10.2.4 CCS 工程项目的调试	286
10.2.5 查看调试过程中的数据和信息	290
习题与思考	291

第 11 章 TMS320C54x 的接口与应用

11.1 典型的数字信号处理系统	292
11.2 TMS320C54x 与 D/A 转换器的接口	293
11.2.1 TLC7528 工作特点	293
11.2.2 TLC7528 器件的引脚	293
11.2.3 TLC7528 工作原理及与 TMS320C54x 的连接	294
11.3 TMS320C54x 与 A/D 转换器的接口	295
11.3.1 TLV1578 的特点和工作条件	295
11.3.2 TLV1578 的引脚及功能	295
11.3.3 TLV1578 的组成结构	296
11.3.4 TLV1578 的工作原理及与 TMS320C54x 的连接	296
11.4 TMS320C54x 的外部存储器和 I/O 扩展	299
11.4.1 TMS320C54x 的程序存储器扩展	299
11.4.2 数据存储器的扩展	301
11.4.3 I/O 扩展	302
11.5 FIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现	304
11.5.1 FIR 数字滤波器的结构特点	305
11.5.2 z^{-1} 算法的实现	305
11.5.3 FIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现	307
11.6 IIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现	308
11.6.1 IIR 数字滤波器的结构特点	308
11.6.2 二阶 IIR 数字滤波器的 TMS320C54x 实现	309
11.6.3 高阶 IIR 数字滤波器	311
习题与思考	311
参考文献	312

上 篇

数字信号处理技术的理论基础

第1章 连续时间信号分析

信号是信息的载体,对信号进行分析的目的在于揭示信号的自身特性,以便有效地对信息进行传输、加工和处理,实现应用。本章在介绍信号基本概念和分类的基础上,讨论连续时间信号的时域、频域和变换域(s 域)分析方法,包括连续时间信号在3个域的描述、典型信号、基本运算、分解、3个域之间的相互关系以及 Matlab 实现。本章是数字信号处理的前续基础知识,离散时间信号的分析方法、结论都是在此基础上展开的。

1.1 概 述

信号是信息的载体,是信息的表现形式,通常表现为随时间、空间等独立变量变化的某种物理量。信号通常用数学表达式和波形来描述,记为单变量函数或多变量函数。随一个独立变量变化的信号称为一维信号,随一个以上独立变量变化的信号称为多维信号。例如:电压、电流、声音、温度等信号,一般看作是随时间(t)变化的一维信号;平面黑白图像信号是平面坐标(x, y)的二维信号,电视图像是平面坐标和时间(x, y, t)的三维信号等。本书只讨论一维信号。

信号分析是研究信号的描述、运算,以及信号发生某些变化时其特性的相应变化,目的在于揭示信号的自身特性。分析的方法主要是将信号分解为若干基本信号分量的线性组合,通过研究这些分量的分布规律来获得原信号的特性。由于信号的分解可以在时域、频域和变换域进行,所以信号分析包括时域分析、频域分析和变换域分析三部分。对于同一信号来说,其3个域的分析存在着密切的内在联系,是从不同的角度来反映同一信号的自身特性,因此,信号在一个域的某种变化将会导致另外两个域出现相对应的变化。

1.2 连续时间信号的时域分析

信号的时域分析就是用时间函数来描述信号的波形及其变化,以获知信号的持续时间、幅度随时间的变化规律和变化速率等时间特性。信号所承载的信息由信号的波形形状来反映,在信号的传输过程中,只要保持信号波形的形状不变,信息就不会丢失。

在时域,时间函数的自变量通常用时间 t 或序号 n 来表示。

1.2.1 信号的分类

实际信号是多种多样的,根据不同的特点,常用信号通常分为以下几种类型。

1. 确定信号与随机信号

能用确定的时间函数来描述的信号称为确定信号,又称为规则信号。对于确定信号,可以求出任一时刻的函数值。不能用确定的时间函数来描述,函数值具有随机性的信号

称为随机信号,又称为不确定信号。对于随机信号,无法预知其变化规律,只能用概率统计的方法进行分析,如噪声和干扰信号等。确定信号与随机信号密切相关,在一定条件下,随机信号也会表现出某种确定性,确定信号是随机信号研究的基础。本书只讨论确定信号。

2. 连续时间信号与离散时间信号

若信号在其定义域内除有限几个间断点外均有定义(能给出确定的函数值),则这种信号称为连续时间信号,通常记为 $x(t)$, 时间变量 t 为实数。连续时间信号的自变量取值是连续的,而幅值(即函数值)可以是连续的(称为模拟信号),也可以是离散的(仅取有限几个规定值)。若信号仅在离散的时间点上有定义,而在其他时间没有定义,则称为离散时间信号,通常记为 $x(n)$, n 为整数,是离散时间点的序号。离散时间信号的自变量取值是离散的,其幅值可以是连续的(称为抽样信号),也可以是离散的(称为数字信号)。

3. 周期信号与非周期信号

若信号波形按一定的时间间隔随着自变量周而复始的变化,而且无始无终,则称为周期信号;反之,称为非周期信号。为了便于识别,本书将周期信号上加“~”,如 $\tilde{x}(t)$ 、 $\tilde{x}(n)$ 。周期信号满足以下条件:

连续时间信号: $\tilde{x}(t) = \tilde{x}(t + mT), m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

离散时间信号: $\tilde{x}(n) = \tilde{x}(n + mN), m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

满足条件的最小正实数 T 或正整数 N 称为周期信号 $\tilde{x}(t)$ 或 $\tilde{x}(n)$ 的周期。

对于周期信号,通过分析任一周期的变化过程就可以确定它在任一时刻的数值。非周期信号在时间上不具备这种周而复始的变化特性,没有周期,或者说其周期趋于无穷大。也就是说,当周期信号的周期 $T \rightarrow \infty$ (或 $N \rightarrow \infty$) 时,周期信号就变成了非周期信号。

4. 时限信号与非时限信号

若信号仅在有限长的时间区间内存在非零幅值,则称为时限信号或有限长信号,表示为

$$x(t) = \begin{cases} x(t), & t_1 < t < t_2 \\ 0, & \text{其他 } t \end{cases} \quad \text{或} \quad x(n) = \begin{cases} x(n), & n_1 \leq n \leq n_2 \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases}$$

其中, t_1, t_2 为任意实数, n_1, n_2 为任意整数,且均为有限值。

若信号的非零幅值所对应的时间区间(简称非零值区间)是无限长的,则称为非时限信号或无限长信号。周期信号一定是非时限信号,而时限信号一定是非周期信号。

非时限信号又分为双边信号、右边信号和左边信号,分别表示为

双边信号: $x(t), -\infty < t < \infty$ 或 $x(n), -\infty < n < \infty$

右边信号: $x(t) = \begin{cases} x(t), & t_3 < t < \infty \\ 0, & \text{其他 } t \end{cases}$ 或 $x(n) = \begin{cases} x(n), & n_3 \leq n < \infty \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases}$

左边信号: $x(t) = \begin{cases} x(t), & -\infty < t < t_4 \\ 0, & \text{其他 } t \end{cases}$ 或 $x(n) = \begin{cases} x(n), & -\infty < n \leq n_4 \\ 0, & \text{其他 } n \end{cases}$

其中, t_3, t_4 为任意实数, n_3, n_4 为任意整数,且均为有限值。

右边信号和左边信号统称为单边信号。右边信号若满足 $x(t) = 0 (t < 0)$, 即 $t_3 \geq 0$ 或 $x(n) = 0 (n \leq -1)$, 即 $n_3 \geq 0$, 则称为因果信号。左边信号若满足 $x(t) = 0 (t > 0)$, 即