



清华大学电子与信息技术系列教材

Signals and Systems

信号与系统

乐正友

Yue Zhengyou

清华大学出版社



清华大学电子与信息技术系列教材

Signals and Systems

信号与系统

乐正友

Yue Zhengyou

清华大学出版社

内 容 简 介

本书研究线性时不变系统传输与处理确定性信号方面的基本概念和基本分析方法。研究对象涉及连续时间域和离散时间域,研究方法包括时域分析和频域分析,重点是频域分析。

全书共分7章。第1章讨论信号、信号运算和卷积。第2章讨论线性时不变系统及其基本性质。第3章和第4章以并行的方式分别讨论连续时间傅里叶变换和离散时间傅里叶变换的基本理论和方法。第5章讨论傅里叶变换在滤波、调制、抽样中的应用。第6章和第7章分别讨论拉普拉斯变换和 z 变换,重点介绍系统函数在系统分析中的应用。

为加强能力的培养,较同类教材而言,本书增加了综合辅导和选读材料。全书各章都有精选的例题和不同类型的习题,并在书末附有各章习题的参考答案。

本书可作为高等院校信号与系统类课程教材,也可供科研与工程技术人员自学参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/乐正友. —北京:清华大学出版社,2004.8

(清华大学电子与信息技术系列教材)

ISBN 7-302-08509-9

I. 信… II. 乐… III. 信号系统—高等学校—教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第035516号

出 版 者:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:邹开颜

版式设计:刘祎森

印 刷 者:北京市昌平环球印刷厂

装 订 者:北京国马印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:35 字数:721千字

版 次:2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-08509-9/TN·184

印 数:1~3000

定 价:45.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103或(010)62795704

前 言



“信号与系统”是大学本科最基本的专业基础课之一,课程内容主要研究信号与系统的基本理论和基本的分析方法,研究对象涉及连续时间域和离散时间域,研究方法包括时域分析和频域分析,重点是频域分析。长期的实践已经表明,这些基本的理论和基本的分析方法已经在众多不同的领域得到了极为广泛的应用,并在这些领域里起着相当重要的作用。

近年来,面对不断出现的新问题、新技术和新机遇的挑战,这些理论和方法也在不断地演变更新,其应用范围也在不断地扩展深化。在此背景下,“信号与系统”的课程内容也必然要引入新的内容和新的知识。

注意到国内外“信号与系统”教材内容的变化,笔者结合自己多年的教学体会,并针对我国学生的具体情况,深感编写一本叙述简洁、讲解透彻、内容丰富、知识更新、强化基础、结合实际教材很有必要。

基于上述考虑,本书加强了三个方面的内容。

首先是加强了基础训练。这体现在两个方面:一是在基本内容的讨论中,对某些重点问题的关键细节进行了较为透彻的讲解和分析;二是在各章内容的安排中增加了综合辅导一节。综合辅导由精心挑选的典型例题及其解答组成,通过对这些例题的分析求解,可以更好地理解和掌握本课程的核心内容。

二是结合实际,加强了分析能力的培养。本书第5章专门讨论了某些实际应用范例,这些应用都是信号与系统基本内容的拓展。通过这一章的学习,可以加深对课程基本内容的理解,同时也可以培养如何利用所学的基本知识去分析解决实际问题。此外,本书还在第3、4、5、7章安排了选读材料,这些材料一般与某些应用相关,其内容生动且富有启发性,有助于拓展视野,提高分析实际问题的能力。

三是加强了离散时间信号和系统的内容。随着全球数字化的发展,“信号与系统”必将以离散时间信号和离散时间系统为主,因此,本书较通行的教材而言,增加了第4章离散时间信号和离散时间系统的分析以及第5章中离散时间系统的应用等内容。此外,对于离散傅里叶变换和快速傅里叶变换,本书只在选读材料中作了简要介绍。笔者认为,这种安排更有利于连续时间信号与系统和离散时间信号与系统之间的衔接,也更有利于理

解和掌握这两者之间的异同性。

在“信号与系统”的教学过程中,注重引导学生转变学习方法,突出问题的分析过程,加强课堂讨论,并在讨论的过程中鼓励学生“大胆假设”,同时也要求学生“小心求证”,这不仅有助于培养学生的科学作风,也有助于激励学生的学习兴趣。

希望本书能有效地帮助读者在信号与系统的学科知识方面打下坚实的基础,熟悉相关应用的基本原理,掌握经典的频域分析方法,并提高解决实际问题的能力。

全书共分7章。第1章讨论信号和信号运算,这里,将卷积列入信号运算之列可以方便读者更好地掌握卷积的运算方法。第2章讨论线性时不变系统及其基本性质,并对系统的数学模型和求解方法作了简要介绍。第3章和第4章以并行的方式分别讨论了连续时间傅里叶变换和离散时间傅里叶变换的基本理论和方法。第5章讨论傅里叶变换在滤波、调制、抽样中的应用,这一章是全书的一个重点和难点,也是提高分析能力的一个台阶。第6章和第7章分别讨论拉普拉斯变换和 z 变换,重点介绍系统函数在系统分析中的应用。

为配合教学,本书各章都安排有精选的例题和不同类型的习题,并在书末附有习题参考答案。标有“*”号的习题具有一定难度,可酌情选用。

本书总学时可按48~64学时安排。一般,各章所需的授课学时可分别安排为4、4、8、6、6、6、8,剩余学时可灵活安排讨论课。

限于能力,书中难免有不妥之处,恳请读者指正。

作 者

2004年2月于清华园

目 录

00100101010110010011001001111010100100110010100100101



绪论	1
第1章 信号及其基本运算	3
1.1 引言	3
1.2 信号的分类	4
1.2.1 连续信号与离散信号	4
1.2.2 周期信号与非周期信号	6
1.2.3 对称信号与非对称信号	9
1.3 典型信号及其基本特性	11
1.3.1 实指数信号	11
1.3.2 复指数信号	13
1.3.3 单位冲激信号和单位阶跃信号	17
1.4 信号的运算及其独立自变量的变换	27
1.4.1 信号的微分与积分运算	27
1.4.2 信号独立自变量的变换	29
1.5 卷积	35
1.5.1 离散信号的卷积	35
1.5.2 连续信号的卷积	40
1.5.3 卷积的基本性质	45
1.6 单位冲激信号 $\delta(t)$ 的性质	50
1.6.1 $\delta(t)$ 的基本性质	50
1.6.2 单位冲激偶信号	52
综合辅导	53
习题	59

第 2 章 线性时不变系统的时域分析	65
2.1 引言	65
2.2 系统的基本特性	66
2.2.1 线性	66
2.2.2 时不变性	68
2.2.3 因果性	69
2.2.4 稳定性	69
2.3 线性时不变系统的时域描述	69
2.3.1 连续时间 LTI 系统的微分方程及其求解	70
2.3.2 δ 函数匹配法	74
2.3.3 差分方程的求解	76
2.4 零输入响应和零状态响应	83
2.4.1 起始状态对系统的影响	83
2.4.2 零输入响应和零状态响应的求解	85
2.5 单位冲激响应	87
2.5.1 冲激响应的特点	88
2.5.2 冲激响应在系统分析中的作用	89
2.5.3 单位阶跃响应	94
综合辅导	97
习题	107
第 3 章 连续时间信号的傅里叶变换	113
3.1 引言	113
3.2 线性时不变系统对复指数正弦激励信号的响应	115
3.3 傅里叶级数	117
3.3.1 傅里叶级数的表达式	117
3.3.2 傅里叶级数的物理意义——频谱	121
3.3.3 傅里叶级数的近似	125
3.4 傅里叶变换	128
3.4.1 傅里叶变换的定义	128
3.4.2 常见信号的傅里叶变换	131
3.5 傅里叶变换的性质	136
3.5.1 对称性	136
3.5.2 共轭对称性	139

3.5.3	线性	142
3.5.4	时移	143
3.5.5	频移特性	146
3.5.6	尺度变换性质	151
3.5.7	时域微分与积分特性	153
3.5.8	频域微分特性	157
3.6	卷积性质	158
3.6.1	时域卷积性质	158
3.6.2	频域卷积性质	162
3.7	周期信号的傅里叶变换	165
3.8	抽样信号的傅里叶变换	169
	综合辅导	173
	选读材料 逆系统的设计及其对系统性能的影响	187
	习题	190
第4章	离散时间信号的傅里叶变换	201
4.1	离散时间傅里叶级数	201
4.1.1	离散时间傅里叶级数的定义	201
4.1.2	离散时间傅里叶级数举例	204
4.1.3	离散时间傅里叶级数的收敛问题	209
4.2	离散时间傅里叶变换	211
4.2.1	离散时间傅里叶变换的定义	211
4.2.2	常见离散时间信号的傅里叶变换	215
4.3	离散时间傅里叶变换的性质	219
4.3.1	线性	219
4.3.2	对称性	219
4.3.3	共轭对称性	222
4.3.4	时移	225
4.3.5	频移	226
4.3.6	时域扩展特性	228
4.3.7	差分与求和	230
4.3.8	频域微分	234
4.4	卷积性质	236
4.4.1	时域卷积性质	236

4.4.2 频域卷积性质	240
4.4.3 周期卷积	242
4.5 周期信号的离散时间傅里叶变换	246
4.6 离散时间抽样信号的傅里叶变换	250
综合辅导	254
选读材料 离散傅里叶变换和快速傅里叶变换	265
习题	271
第5章 傅里叶变换的应用	276
5.1 引言	276
5.2 系统响应的频域分析	277
5.3 无失真传输	281
5.4 理想低通滤波器	285
5.4.1 理想低通的频率特性及其冲激响应	285
5.4.2 理想低通滤波器的阶跃响应	287
5.4.3 应用举例: 汽车减震与离散时间滤波器	290
5.5 调制与解调	294
5.5.1 正弦幅度调制	296
5.5.2 正弦幅度调制信号的解调	297
5.5.3 单边带正弦幅度调制	301
5.5.4 脉冲幅度调制	304
5.5.5 脉冲编码调制	309
5.5.6 多路复用	311
5.6 抽样	317
5.6.1 由抽样信号的样本值重建连续时间信号	317
5.6.2 混叠现象的时域分析	320
5.6.3 连续时间信号的离散时间处理	323
5.6.4 离散时间信号的抽取和内插	328
综合辅导	336
选读材料 频闪效应	350
习题	353
第6章 拉普拉斯变换	360
6.1 拉普拉斯变换的定义	361

6.1.1	基本定义	361
6.1.2	常见信号的拉氏变换	362
6.1.3	拉氏变换的收敛域	366
6.1.4	单边拉氏变换	370
6.2	拉氏变换的基本性质	371
6.2.1	线性	371
6.2.2	时移	372
6.2.3	s 域平移	373
6.2.4	尺度变换	374
6.2.5	时域卷积	374
6.2.6	时域微分	375
6.2.7	s 域微分	376
6.2.8	时域积分	377
6.2.9	初值定理	379
6.2.10	终值定理	380
6.3	周期信号和抽样信号的拉氏变换	382
6.4	拉普拉斯逆变换	384
6.5	系统函数	389
6.5.1	系统函数的定义	389
6.5.2	系统函数与系统微分方程	390
6.5.3	系统函数与冲激响应	393
6.5.4	系统函数与系统框图	394
6.6	由系统函数的零极点分析系统的稳定性	398
6.6.1	系统函数零极点与冲激响应波形间的关系	398
6.6.2	系统函数与系统的稳定性	402
6.7	由系统函数的零极点分析系统的频率特性	406
6.7.1	频率响应的几何求解方法	406
6.7.2	一阶系统	409
6.7.3	二阶系统	410
6.7.4	全通网络	415
综合辅导		418
习题		427

第7章 z 变换及离散时间系统的 z 域分析	435
7.1 z 变换的定义	435
7.1.1 z 变换的基本定义	436
7.1.2 从抽样信号的拉氏变换导出 z 变换	437
7.1.3 s 平面与 z 平面之间的映射关系	438
7.2 常用序列的 z 变换	439
7.3 z 变换的收敛域	446
7.3.1 逆 z 变换的定义	447
7.3.2 留数法	448
7.3.3 长除法	453
7.3.4 部分分式展开法	455
7.4 z 变换的性质	458
7.4.1 线性	458
7.4.2 位移特性	459
7.4.3 差分与求和性质	463
7.4.4 时域卷积	465
7.4.5 z 域微分	467
7.4.6 z 域尺度变换	467
7.4.7 初值定理	469
7.4.8 终值定理	470
7.4.9 z 域卷积定理	472
7.5 利用 z 变换求差分方程的解	474
7.6 系统函数	475
7.6.1 系统函数的定义与求解	476
7.6.2 系统函数与系统框图	479
7.7 利用系统函数的零极点分析系统的基本特性	485
7.7.1 冲激响应的包络特性	485
7.7.2 稳定性	487
7.7.3 因果性	488
7.8 离散时间系统的频率响应	490
7.8.1 频率响应的定义	490
7.8.2 利用系统函数零极点求系统频率响应曲线	494

综合辅导.....	499
选读材料 连续时间系统与离散时间系统之间的转换.....	509
习题.....	515
习题参考答案.....	523
参考文献.....	546

绪论

1. 信号的基本定义

信号与系统是两个用得极为广泛的基本概念。无论在自然科学还是在社会科学中,大至天体宇宙、人类社会,小至生物细胞、原子结构,都存在有信号与系统的应用研究问题。在这些不同的领域中,虽然信号与系统的物理属性和表现形式各不相同,然而它们的基本含义是相同的。

从基本含义上讲,信号是用来传递某种消息或信息的物理形式。例如,“山雨欲来风满楼”、“春江水暖鸭先知”,这些自然现象中的信号向我们传递了气候变化的信息;又如,人们用声音和文字信号表达自己的思想与情感;医学工作者用生物电信号描述人体的器官功能;经济学者用经济统计数据评价和预测社会经济的发展等。在这些例子中,虽然信号的形式各不相同,但它们都是传递信息或消息的载体。对于不同的学科领域,信息的载体具有不同的物理形式,常见的形式如声、光、电、力等。本书主要讨论电信号,这类信号通常由随时间而变化的电压、电流、电场或磁场来描述。

2. 系统的基本定义

广义而言,系统是对输入信号作出响应的物理结构。其本质是对输入信号进行相应的处理,并将处理后的信号作为系统的输出,这种输出也称之为系统的响应。例如,人体的味觉神经系统可以感觉到食物的酸甜苦辣;计算机的显示系统可以在屏幕上显示键盘输入的每一个字符;通信网络系统可以根据输入的信号将天各一方的亲朋好友互联在一起。虽然系统一词包罗万象,种类繁多,大小不一,但在对输入信号作出响应这一点上是相通的。

按照系统的形成来划分,系统大致可分为两类:一类是自然形成的系统,如天体地球等;另一类是人为设计的系统,如电子系统、通信系统等。人为设计的系统一般是根据设计人员的需要来实现某种特定的功能。这种系统通常由若干相互关联的元器件或子系统进行连接而形成一个整体。例如,一个最简单的积分电路系统可以由一个电阻和一个电容元件组成,其基本功能是对输入信号进行积分后输出。本书仅讨论人为设计的系统。

3. 信号与系统课程的主要研究内容

信号理论的研究主要有两个方面的内容,即信号分析与信号综合。信号分析主要研

究信号的描述方法、信号数学模型的建立以及信号的基本特性；信号综合则是根据具体的要求来设计、产生所需要的信号。

系统理论的研究方法也有分析与综合之分。系统分析包括有建立系统的数学模型以及借助系统模型研究系统的基本属性，如系统的响应特性、频率特性、稳定性等；系统综合则是在给定的条件下设计出所需要的系统，例如，要求所设计的系统对某种给定的输入信号产生某种给定的输出信号就属于系统综合的问题。

虽然建立系统模型需要一些相应的专业基础知识，而且不同的系统所需要的专业基础知识又各不相同，但是，当把系统抽象为数学模型以后，它们的分析方法是相通的。因此，本书内容仅限于信号与系统的分析，主要讨论系统对不同输入信号的响应，而要确定系统的响应，有关信号与系统的特性及其描述方法当然是必不可少的研究内容。此外，本书所研究的系统只涉及线性时不变系统。之所以只讨论线性时不变系统，不仅由于大多数物理系统可以近似为线性时不变系统，更重要的是，长期以来对线性时不变系统的研究已经形成了一套完整、严密且能普遍适用的分析方法，而且，这些分析方法也能为研究非线性时变系统所借鉴。

信号与系统是两个密切相关的概念。在许多实际应用中，尤其是在信号提取、信号恢复、信号增强、语音识别等数字信号处理的课题以及大规模集成电路的设计中，它们往往被有机地融合在一起。例如，为了实时地识别语音，一方面要分析研究语音信号的各种特性，建立语音信号的数学模型，确定语音信号的编码方法以及识别算法；另一方面则要仔细设计专用硬件，而硬件的设计又和语音信号的种种特性戚戚相关。信号与系统这种密切相关的特点也是本课程得以受到广泛重视的原因之一。

本书将从时域和变换域两方面对信号和线性时不变系统进行分析讨论，分析工具包括有微分方程、差分方程、傅里叶变换、拉普拉斯变换以及 z 变换等。长期的历史实践已经证明，这些经典的分析方法对解决具体的实际问题确实行之有效，它们在不同的学科领域中都得到了广泛而重要的应用。毫无疑问，随着科技的发展与进步，这些方法已经得到并将得到进一步的发展，其应用领域也将得到进一步的拓宽和延伸。因此，扎实地掌握这些基本的分析方法，透彻地理解相应的物理概念，深入地吸收寄寓于这些方法和概念中的有关思想，是学好后续课程以及在今后工作中具有发展潜力的可靠保证。

第 1 章

信号及其基本运算

本章教学目标

- 掌握基本信号及其主要特性
- 正确理解单位冲激信号的三种定义并掌握其主要性质的应用
- 掌握信号运算及其相关的波形变换
- 掌握卷积运算的两种基本方法
- 正确理解信号的分解

本章重点和难点

- 单位冲激信号的性质与应用
- 卷积

1.1 引言

信号是传递信息或消息的载体,其所携带的全部信息寄寓在信号的变化过程之中。通常,对信号的描述可以采用数学函数式或以图形表示。

在数学上,信号可以表示为单个自变量或多个自变量的函数。具有单个自变量的信号称为一维信号;具有多个自变量的信号称为多维信号。信号的自变量可以是时间、空间位置或其他物理量。例如,日常生活中的语音信号是声压随时间变化的一维信号;黑白图片是亮度随空间位置变化的二维信号;而气象观测中的气压、温度和风速则是随高度而变化的一维信号等。为方便起见,本书以时间作为信号的自变量,且只讨论一维信号。

信号的图形也称为信号的波形。虽然用波形描述信号难以精确地给出信号的每一个

函数值,但是,这种方法可以简单而直观地描绘出信号的变化趋势,在许多应用中还常常可以简化问题的求解。读者将会看到,本书中许多问题的求解都是通过波形分析而得到了简化。当以波形描述一个信号时,应注意在波形图上标出该信号的某些关键值,这些关键值包括有信号的不连续点、零点、最大值点和最小值点等。

本章将在介绍几种典型的基本信号以后详细地讨论信号的运算。这些基本的信号之所以典型,不仅在于它们是一些常见的信号,而且,利用信号的运算可以将这些信号组合成其他许多信号。本章的重点是单位冲激信号和信号卷积运算,它们是贯穿全书的基本内容。

1.2 信号的分类

根据信号的不同特性,信号有多种分类方法。

按信号的确定性划分,信号可分为确定性信号和随机信号。对于任一自变量值,若信号有确定的函数值,这种信号就称为确定性信号;反之,如果不能给出确定的函数值,则是随机信号。确定性信号和随机信号之间并不是截然分开的。一般而言,人为设计或生成的信号都是确定性信号,但是,在这些信号的传送过程中,由于传送媒质的衰耗特性和频率特性的限制,这些信号不可避免地会受到各种干扰和噪声的影响,而这些干扰和噪声都具有某种随机性。另一方面,对随机信号而言,在一定的条件下,它们往往会表现出某种确定性。例如,语音信号本质上是随机信号,但是,组成语音信号的元音和辅音波形却具有确定的周期性和确定的频率特性。本书只讨论确定性信号,至于确定性信号在传送过程中所产生的干扰和噪声的滤除问题则属于其他课程研究的范畴。

对于确定性信号,按其周期性可分为周期性信号和非周期性信号;按其连续性可分为连续信号和离散信号。这两类信号是本节讨论的主要内容。

1.2.1 连续信号与离散信号

根据信号自变量的连续性,可将信号划分为连续信号与离散信号。如果自变量是连续的时间变量,则是连续信号;如果自变量是离散的时间变量,则是离散信号。连续信号和离散信号的例子随处可见。例如,音乐、电视信号是随时间而变的连续信号;活期存款利息、股市行情指数是随时间而变的离散信号。

直观上看,连续即自变量没有间断,也就是说信号的自变量可以在其定义域内取任意值,如 0.00325 、 7 、 π 等;离散则指自变量有间断,信号的自变量不能在其定义域内取任意

值,而只能取一组离散的规定值,如整数值,在规定值以外的自变量是没有意义的。显然,由于自变量的连续性,连续信号的波形也是连续的,其函数值可以是连续的任意值,也可以是不连续的规定值。同样,对离散信号而言,由于自变量的离散性,其信号波形是离散的,但信号的函数值可以是连续的任意值或不连续的规定值。通常,对于函数值不连续的离散信号称之为数字信号,对于函数值连续的离散信号称之为抽样信号。这里,所谓抽样,就是采集连续信号在规定时刻的幅度值,而所有不同时刻的采集结果就构成了一个抽样信号。本书中,离散信号一般指抽样信号。

为了明确地区分连续信号和离散信号,本书将以 $x(t)$ 表示连续信号,以 $x[n]$ 表示离散信号。在抽样信号的讨论中,这种表示方法有助于更准确地理解信号的特性。

图 1.1 给出了几个连续信号和离散信号的波形。其中, $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 是连续信号, $x_1(t)$ 在 $t \geq 0$ 的定义域内函数值为连续的任意值,而 $x_2(t)$ 在 $-\infty \leq t \leq \infty$ 的定义域内只能取 -1、0 和 1 这 3 个规定值。 $x_3[n]$ 和 $x_4[n]$ 都是离散信号,不过, $x_3[n]$ 属于抽样信号, $x_4[n]$ 属于数字信号。虽然 $x_3[n]$ 和 $x_4[n]$ 的自变量 n 都定义在 $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 离散的整数值上,但它们函数值的特性不同。其中, $x_3[n]$ 的函数值为连续的任意值,而 $x_4[n]$ 的函数值仅为 0 和 1。离散信号的自变量一般都取整数值,这种信号也常称为序列。通常,将离散信号自变量的取值时刻称为样点,将离散信号的函数值称为样值或样点值。

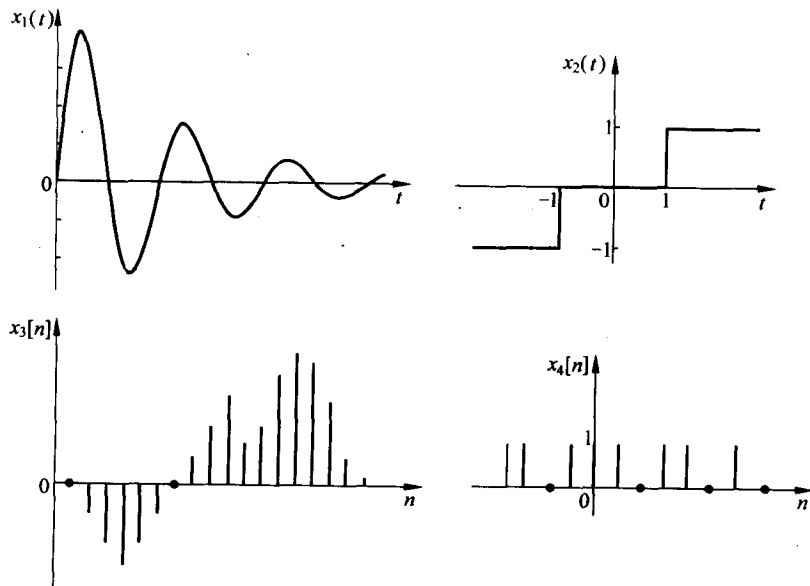


图 1.1 连续信号与离散信号图例