

北京市高等教育精品教材立项项目《信号与系统》配套教材



国家电工电子教学基地系列教材

信号与系统 学习指导及习题精解

◎ 陈后金 主编

◎ 胡健 薛健 钱满义 编



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



北京市高等教育精品教材立项项目《信号与系统》配套教材

国家电工电子教学基地系列教材

信号与系统学习指导及 习题精解

陈后金 主编

胡 健 薛 健 钱满义 编

·北京·

内 容 简 介

本书是陈后金教授主编的北京市高等教育精品教材立项项目《信号与系统》的配套教材。本书围绕主教材的章节结构展开,每章由基本知识与重要公式、学习要求、重点和难点提示、思考题、习题精解5个相互关联的部分组成,突出基本理论、基本概念和基本方法。习题精解给出了主教材中所有习题的详细解答,并对重点和难点习题附加了分析思路。书中最后给出近年来北京交通大学的4套硕士研究生入学试题及其详解。此书可作为电子信息工程、通信工程、信息工程、自动控制工程、生物医学工程、计算机等专业的学生学习信号与系统课程及报考研究生的参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

(本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂沫,图案在白纸上再现的方法识别真伪。)

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统学习指导及习题精解/陈后金主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2005.2

(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 7-81082-464-3

I. 信… II. 陈… III. 信号系统-高等学校-教学参考资料 IV. TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第126720号

责任编辑:韩 乐

出版者:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京东光印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:19.5 字数:412千字

版 次:2005年2月第1版 2005年2月第1次印刷

书 号:ISBN 7-81082-464-3/TN·25

印 数:1~5 000册 定价:26.00元

国家电工电子教学基地系列教材 编审委员会成员名单

主任 谈振辉

副主任 张思东 赵乐沅 孙雨耕

委员 (以姓氏笔画为序)

王化深 卢先河 刘京南 朱定华 沈嗣昌

严国萍 杜普选 李金平 李哲英 张有根

张传生 张晓冬 陈后金 邹家驷 郑光信

屈波 侯建军 贾怀义 徐国治 徐佩霞

廖桂生 薛质 戴瑜兴

总 序

当今信息科学技术日新月异，以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才，促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高，都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来，国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践，探索了各课程的认知规律，确定了科学的教育思想，理顺了课程体系，更新了课程内容，融合了现代教学方法，取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果，在借鉴国内外同类有影响教材的基础上，决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色：

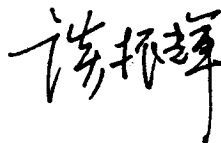
- 在教育思想上，符合学生的认知规律，使教材不仅是教学内容的载体，也是思维方法和认知过程的载体。
- 在体系上，建立了较完整的课程体系，突出了各课程内在联系及课程群内各课程的相互关系，体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。
- 在内容上，体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系，反映当今信息科学与技术的新概念和新理论，内容阐述深入浅出，详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题，培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。
- 在辅助工具上，注重计算机软件工具的运用，使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用，提高了学习效率和效果。

本系列教材包括：

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《电路分析学习指导及习题精解》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《信号与系统学习指导及习题精解》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信息处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》(含上、下册)、《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北京交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持，在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助，在此表示衷心的感谢。

北方交通大学
“国家电工电子教学基地系列教材”
编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '高辉' (Gao Hui), written in a cursive style.

2005年1月

前 言

信号与系统课程是电气信息类专业重要的技术基础课程，陈后金教授主持建设的该课程2003年被评为国家精品课程（网址：<http://col.njtu.edu.cn/jingpinke/xhyxt/index.htm>）。该课程教材按照主教材与辅助教材相配套、纸质教材与电子教材相结合进行立体化建设，编著的北京市高等教育精品教材立项项目《信号与系统》已由清华大学出版社与北京交通大学出版社联合出版，在一年内已3次重印，相应的电子教材（电子教案、网络课程、试题库等）也将陆续出版。

本教材作为北京市高等教育精品教材立项项目《信号与系统》的辅助教材，按照主教材的连续与离散并行、先信号分析后系统分析、先时域分析后变换域分析的结构体系，与主教材相对应共分10章，每章由基本知识与重要公式、学习要求、重点和难点提示、思考题、习题精解5个相互关联的部分组成。基本知识与重要公式突出基本理论、基本概念和基本方法，学习要求给出了需要掌握的知识点，思考题启发读者对相关原理和概念的关注，习题精解给出了主教材中所有习题的详细解答，并对重点和难点习题附加了分析思路。书中最后给出了北京交通大学近年来4套硕士研究生入学试题及其详解。

本教材可作为电子信息工程、通信工程、信息工程、自动控制工程、生物医学工程、计算机等专业的学生学习信号与系统课程或报考研究生的参考书。

本教材由陈后金、胡健、薛健、钱满义编写，郝晓莉提供了部分素材，最后由陈后金统稿并主编。本教材的出版得到了北京交通大学教务处和电子信息工程学院的大力支持，在此深表谢意。

限于水平，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2005年1月

于北京交通大学国家电工电子教学基地

目 录

第 1 章 信号与系统分析导论	1
1.1 基本知识与重要公式	1
1. 信号分类与特性	1
2. 系统的分类和特性	2
3. 信号与系统分析概述	3
1.2 学习要求	4
1.3 重点和难点提示	4
1.4 思考题	5
1.5 习题精解	5
第 2 章 信号的时域分析	14
2.1 基本知识与重要公式	14
1. 连续时间信号的时域描述	14
2. 连续时间信号的时域运算	15
3. 离散时间信号的时域描述	15
4. 离散时间信号的时域运算	16
5. 信号的时域分解	17
2.2 学习要求	18
2.3 重点和难点提示	18
1. 常用基本信号的时域描述	18
2. 信号的时域运算	18
3. 信号的时域分解	19
2.4 思考题	19
2.5 习题精解	19
第 3 章 系统的时域分析	41
3.1 基本知识与重要公式	41
1. LTI 系统的描述	41

2. 连续时间系统的时域分析	41
3. 连续时间系统的冲激响应 $h(t)$	42
4. 卷积积分	43
5. 离散时间系统的时域分析	43
6. 离散时间系统的单位脉冲响应 $h[k]$	44
7. 卷积和	44
3.2 学习要求	45
3.3 重点和难点提示	45
3.4 思考题	45
3.5 习题精解	46
第 4 章 周期信号的频域分析	84
4.1 基本知识与重要公式	84
1. 连续周期信号的频域分析	84
2. 离散周期信号的频域分析	85
4.2 学习要求	86
4.3 重点和难点提示	86
4.4 思考题	87
4.5 习题精解	87
第 5 章 非周期信号的频域分析	103
5.1 基本知识与重要公式	103
1. 连续非周期信号的频谱分析	103
2. 常见信号的频谱与 Fourier 变换的基本特性	103
3. 离散非周期信号的频谱分析	105
5.2 学习要求	106
5.3 重点和难点提示	106
1. 非周期信号的频谱分析	106
2. 常见信号的频谱与 Fourier 变换的基本特性	106
5.4 思考题	107
5.5 习题精解	107
第 6 章 系统的频域分析	124
6.1 基本知识与重要公式	124
1. 连续时间系统的频响特性	124
2. 连续时间系统响应的频域分析	124
3. 无失真传输系统与理想低通滤波器	125
4. 时域抽样定理	127

6.2	学习要求	127
6.3	重点和难点提示	128
	1. 系统的频响特性与系统响应的频域分析	128
	2. 时域抽样定理	128
6.4	思考题	128
6.5	习题精解	129
第7章	连续时间信号与系统的复频域分析	140
7.1	基本知识 with 重要公式	140
	1. 连续时间信号与系统的复频域分析	140
	2. 连续时间系统的系统函数与系统特性	142
	3. 连续时间系统的联结与模拟	144
7.2	学习要求	145
7.3	重点和难点提示	145
	1. 连续时间系统的复频域分析	145
	2. 连续时间系统的系统函数与系统特性	145
7.4	思考题	145
7.5	习题精解	146
第8章	离散时间信号与系统的 z 域分析	179
8.1	基本知识 with 重要公式	179
	1. 离散时间信号与系统 z 域分析	179
	2. 系统函数 $H(z)$ 与系统特性	181
	3. 离散时间系统的联结与模拟	182
8.2	学习要求	184
8.3	重点和难点提示	184
	1. 离散时间系统 z 域分析	184
	2. 系统函数 $H(z)$ 与系统特性	184
8.4	思考题	184
8.5	习题精解	185
第9章	系统的状态变量分析	216
9.1	基本知识 with 重要公式	216
	1. 状态方程的一般形式	216
	2. 系统状态方程的建立	217
	3. 系统状态方程的求解	217
9.2	学习要求	218
9.3	重点和难点提示	219

9.4 思考题	219
9.5 习题精解	219
第 10 章 信号的调制与解调	248
10.1 基本知识与重要公式	248
1. 抑制载波双边带幅度调制与解调	248
2. 单边带幅度调制	249
3. 频分复用与时分复用	250
10.2 学习要求	251
10.3 重点和难点提示	251
10.4 思考题	251
10.5 习题精解	252
附录 A 北京交通大学近年研究生入学考试试题详解	264
A.1 2001 年研究生入学考试试题及详解	264
A.2 2002 年研究生入学考试试题及详解	272
A.3 2003 年研究生入学考试试题及详解	280
A.4 2004 年研究生入学考试试题及详解	290

第 1 章 信号与系统分析导论

1.1 基本知识与重要公式

1. 信号分类与特性

信号是指消息的表现形式与传送载体。根据信号和自变量的特性，信号可以分为多种类型。从信号的确定性划分，信号可分为确定信号与随机信号；从信号自变量的取值划分，信号可分为连续时间信号与离散时间信号；从信号的周期性划分，信号可分为周期信号与非周期信号；从信号的可积性划分，信号可分为能量信号与功率信号。

确定信号是指能够以确定的时间函数表示的信号，而随机信号则是不能以确定的时间函数表示的信号，分别如图 1-1(a)、(b)所示。连续时间信号是指在信号的定义域内，除有限个间断点外，任意时刻都有确定函数值的信号，而离散时间信号其时间自变量的定义域为一些离散时刻，分别如图 1-1(c)、(d)所示。连续时间信号和离散时间信号若分别满足

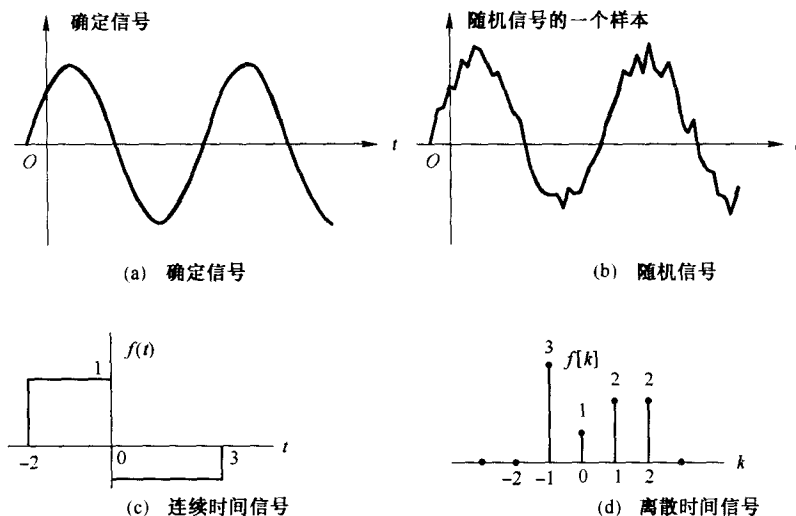


图 1-1 信号的分类

$$f(t) = f(t + nT_0), n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad -\infty < t < \infty \quad (1-1)$$

$$f[k] = f[k + nN], n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1-2)$$

其中 T_0, N 分别称为周期信号的基本周期(基波周期), 则为周期信号, 否则为非周期信号。若信号的归一化能量为非零的有限值, 且其归一化功率为零, 则为能量信号; 若信号的归一化能量为无限值, 且其归一化功率为非零的有限值, 则为功率信号。

本课程重点研究确定性的连续时间信号和离散时间信号的时域及变换域分析。

2. 系统的分类和特性

系统是指能够完成某些特定功能的整体。根据系统的数学模型和基本特性, 系统可分为连续时间系统与离散时间系统; 线性系统与非线性系统; 时变系统与时不变系统; 因果系统与非因果系统, 稳定系统与非稳定系统等。若系统的输入激励与输出响应均为连续时间信号, 则为连续时间系统。若系统的输入激励与输出响应均为离散时间信号, 则为离散时间系统。若系统具有线性特性(均匀特性与迭加特性), 则为线性系统。否则, 就是非线性系统。若系统在零状态条件下, 其输出响应与输入激励的关系不随输入激励作用于系统的时间起点而改变时, 则为时不变系统。否则, 就是时变系统。若系统的输出响应不超前于输入激励则为因果系统。否则, 就是非因果系统。若系统对任意的有界输入其输出也有界, 则为稳定系统。否则, 就是非稳定系统。

本课程主要研究线性时不变的连续时间系统和离散时间系统的时域分析与变换域分析, 因为线性时不变特性是进行系统分析的前提和基础。

线性特性包括均匀特性与迭加特性, 连续时间系统的线性特性可表示为:

$$\begin{aligned} \text{若} & \quad y_1(t) = T\{f_1(t)\}, \quad y_2(t) = T\{f_2(t)\} \\ \text{则} & \quad T\{\alpha \cdot f_1(t) + \beta \cdot f_2(t)\} = \alpha \cdot y_1(t) + \beta \cdot y_2(t) \end{aligned} \quad (1-3)$$

其中 α, β 为任意常数。离散时间系统的线性特性可表示为

$$\begin{aligned} \text{若} & \quad y_1[k] = T\{f_1[k]\}, \quad y_2[k] = T\{f_2[k]\} \\ \text{则} & \quad T\{\alpha \cdot f_1[k] + \beta \cdot f_2[k]\} = \alpha \cdot y_1[k] + \beta \cdot y_2[k] \end{aligned} \quad (1-4)$$

其中 α, β 为任意常数。

时不变特性是指系统在零状态条件下, 输出响应与输入激励的关系不随输入激励作用于系统的时间起点而改变, 如图 1-2 所示。连续时间系统的时不变特性可表示为:

$$\begin{aligned} \text{若} & \quad y_f(t) = T\{f(t)\} \\ \text{则} & \quad T\{f(t - t_0)\} = y_f(t - t_0) \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 t_0 为任意值。

离散时间系统的时不变特性可表示为:

$$\begin{aligned} \text{若} & \quad y_f[k] = T\{f[k]\} \\ \text{则} & \quad T\{f[k - n]\} = y_f[k - n] \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 n 为任意整数。

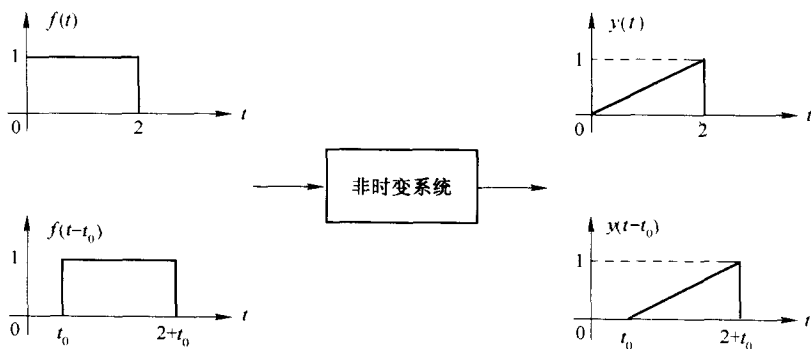
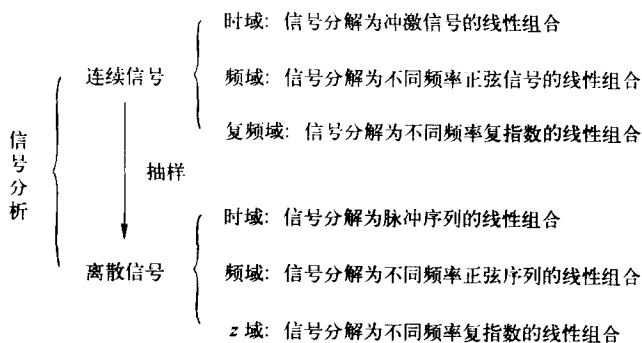


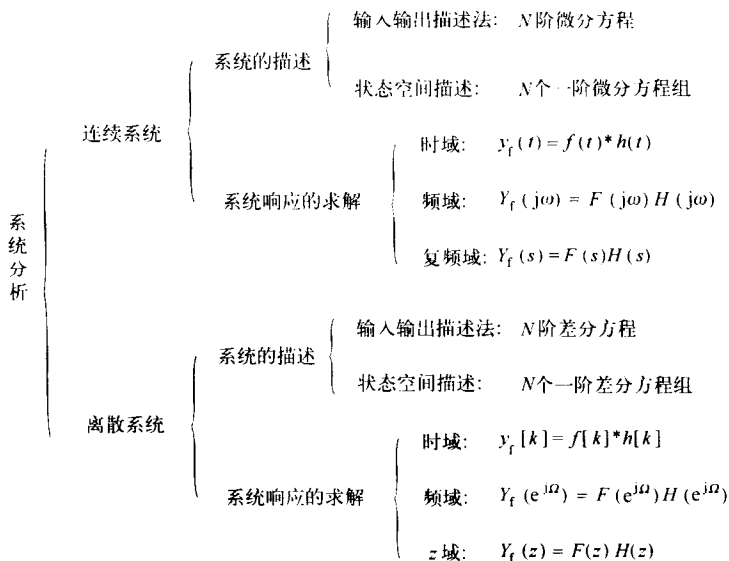
图 1-2 时不变系统

3. 信号与系统分析概述

信号与系统分析主要包括信号分析与系统分析两部分内容。信号分析的核心内容是信号分解，即将复杂信号分解为一些基本信号的线性组合，通过研究基本信号的特性和信号的线性组合关系来研究复杂信号的特性。信号分析的主要内容可以简要概括如下。



系统分析的主要任务就是建立系统的数学模型，求解线性时不变系统的输出响应。对于线性时不变系统，其零状态响应可以通过基本信号作用在系统上的响应及系统的线性时不变特性求出。系统分析的主要内容可以简要概括如下。



1.2 学习要求

- (1) 掌握信号的定义及分类。
- (2) 掌握系统的描述、分类及特性。
- (3) 重点掌握确定信号及线性时不变系统的特性。

1.3 重点和难点提示

由于本课程主要研究线性时不变系统的时域分析与变换域分析,因此线性时不变是本章的重点。学习时应能够判断系统是否为线性时不变系统,牢固掌握并能熟练应用式(1-3)和式(1-4)的线性特性,以及式(1-5)和式(1-6)的时不变特性。

在判断具有初始状态的系统是否线性时,应从可分解性、零输入线性与零状态线性3方面来判断,若系统的输出响应可分解为零输入响应与零状态响应之和,且系统的零输入响应对所有的初始状态呈现线性特性,系统的零状态响应对所有的输入信号呈现线性特性,则为线性系统。否则,为非线性系统。

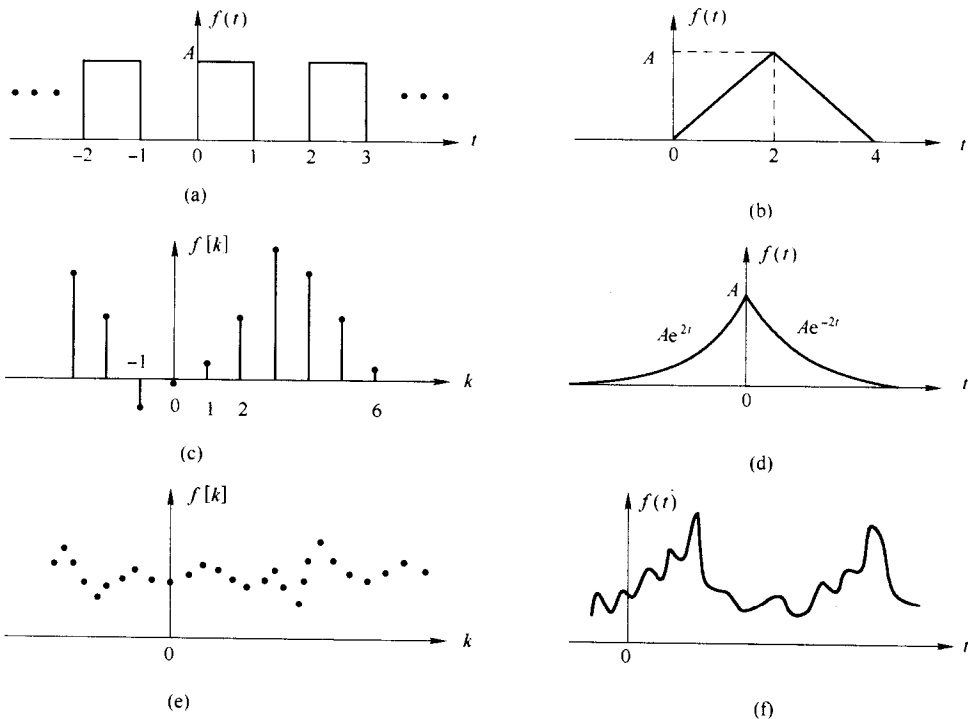
在判断系统的时不变特性时,不涉及系统的初始状态。若系统响应 $y(t)$ 中除了激励 $f(t)$ 含有时间变量 t 外,仍含有时间 t 的函数,则为时变系统。

1.4 思考题

- (1) 如何对信号进行分类？各类信号的本质区别是什么？
- (2) 一个信号可否既是能量信号又是功率信号？可否既不是能量信号又不是功率信号？
- (3) 如何判断一个系统为线性系统？线性系统是否一定为时不变系统？
- (4) 如果某系统对某些输入信号其输出滞后输入，可否断定该系统为因果系统？
- (5) 信号与系统为什么是不可分割的整体？

1.5 习题精解

1-1 试指出下列各信号类型。



题 1-1 图

【解】可以从不同的角度对信号进行分类，主要分为确定信号与随机信号、连续信号与离散信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号等。

- (1) 题 1-1(a)图信号是个确定、连续、周期、功率信号(周期信号和直流信号为功率

信号)。

- (2) 题 1-1(b)图信号是确定、连续、非周期、能量信号。
 (3) 题 1-1(c)图信号是确定、离散、非周期、能量信号。
 (4) 题 1-1(d)图信号是确定、连续、非周期、能量信号。
 (5) 题 1-1(e)图信号是随机、离散、非周期、功率信号(随机信号为功率信号)。
 (6) 题 1-1(f)图信号是随机、连续、非周期、功率信号。

1-2 给定一个连续时间信号为

$$f(t) = \begin{cases} 1 - |t| & , -1 \leq t \leq 1 \\ 0 & , \text{其他} \end{cases}$$

分别画出以 0.25 s 和 0.5 s 的取样间隔对 $f(t)$ 均匀取样所得离散时间序列的波形。

【解】信号可以是连续的或者是离散的,有的离散信号本身就是离散的,有的离散信号是连续信号经过抽样得到的,如 $f[k] = f(t)|_{t=kT} = f[kT]$, T 是抽样间隔。

若 $T_1 = 0.25$ s, $f_1[k] = f(t)|_{t=0.25k}$, 则

$$f_1[k] = \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 0.75, 0.5, 0.25, 0; k = -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}.$$

若 $T_2 = 0.50$ s, $f_2[k] = f(t)|_{t=0.5k}$, 则

$$f_2[k] = \{0, 0.5, 1, 0.5, 0; k = -2, -1, 0, 1, 2\}$$

$f(t)$, $f_1[k]$, $f_2[k]$ 的波形如图 1-3 所示。

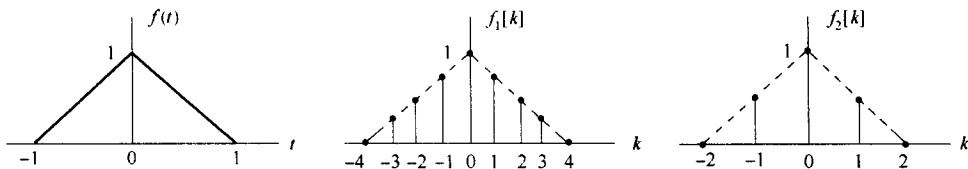


图 1-3 题 1-2 解答图

1-3 设 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 是基本周期分别为 T_1 和 T_2 的周期信号。证明 $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$ 是周期为 T 的周期信号的条件为 (m 、 n 为正整数)

$$mT_1 = nT_2 = T$$

【证】 设 $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$ 的周期为 T , 则存在

$$f(t+T) = f_1(t+T) + f_2(t+T) = f(t) = f_1(t) + f_2(t)$$

而

$$f_1(t) + f_2(t) = f_1(t + mT_1) + f_2(t + nT_2)$$

所以

$$mT_1 = nT_2 = T$$

1-4 设 $f_1[k]$ 和 $f_2[k]$ 是基本周期分别为 N_1 和 N_2 的周期序列。证明 $f[k] = f_1[k] + f_2[k]$ 是周期为 N 的周期序列的条件为 (m 、 n 为正整数)

$$mN_1 = nN_2 = N$$

【证】 设 $f[k] = f_1[k] + f_2[k]$ 的周期为 N , 则存在