

普通高等教育“十三五”规划教材

普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

# 信号与系统基础 及应用

FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS OF  
SIGNALS AND SYSTEMS

张晓青 © 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材  
普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材

# 信号与系统基础及应用

主 编 张晓青  
参 编 耿 蕊 王 君



机械工业出版社

本书较为系统地讲述了信号与系统的基本概念、信号与系统的基本分析理论、信号的离散傅里叶变换分析方法、数字滤波器的系统设计方法等内容,形成了一个信号与系统基础理论及其应用相对完整的知识体系。全书分为7章,第1~5章为基础理论部分,以傅里叶变换、拉普拉斯变换和 $z$ 变换三大变换为主线,先讲连续后讲离散,从时域和频域两个方面介绍了信号和系统的基本分析理论。为了能够做到学以致用,在理论上,第6章对信号频谱的离散傅里叶变换分析方法及其应用做了深入的探讨,第7章对数字滤波器的离散时间系统设计方法及其实现做了专门的阐述。同时,在每一章的最后一节均给出部分 MATLAB 程序代码实例,供读者上机学习;在每一章的最后还附有少量习题,供读者练习。

本书可供普通高等院校理工科相关专业的本科教学使用,也可作为理工科相关专业工程技术人员的参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 [jinacmp@163.com](mailto:jnacmp@163.com) 索取,或登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

信号与系统基础及应用/张晓青主编. —北京:机械工业出版社,2017.7  
普通高等教育测控技术与仪器专业规划教材  
ISBN 978-7-111-57312-8

I. ①信… II. ①张… III. ①信号系统-高等学校-教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 161666 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 王荣 于苏华  
责任校对:张征 封面设计:张静  
责任印制:常天培  
唐山三艺印务有限公司印刷  
2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm×260mm·17 印张·412 千字  
标准书号:ISBN 978-7-111-57312-8  
定价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线:010-88379649

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前 言

随着计算机软硬件技术的飞速发展,与之相关的各门课程在不断更新和变革。作为高等院校理工科相关专业的重要课程,“信号与系统”“数字信号处理”等课程在教学内容、教学手段、教学方法等方面迫切需要加大改革力度。对于仪器科学与技术、光学工程等学科及专业来讲,一方面由于“信号与系统”等课程在其课程体系中占有举足轻重的地位,另一方面根据目前在全国广泛开展的工程教育专业认证的要求,必须进一步凝练课程教学目标、优化教学内容,将课程教学与提高工程实践能力紧密结合以培养应用型人才。因此对现有的课程内容进行重新整合已经势在必行。

本书阐述了信号与系统的基本概念、基本理论、基本分析方法,并结合信号与系统的典型应用进行讲解,是一本整合了“信号与系统”和“数字信号处理”两门课程核心内容的新的本科教材。它既有信号与系统的基础理论,又有信号与系统的应用实例,取材适当,内容合理,符号严谨,注重连续与离散的区别和联系,强调先进的数字信号处理技术与实际系统的紧密关联,形成了完整的内容体系,并具有鲜明的工程实践特色。完整讲授本书的学时数约为48学时,另外配有8~12学时的实验内容,这种编排符合普通高等院校一个学期的教学时数安排。

全书共分7章。第1~5章为信号与系统知识体系的基础部分,第1章为全书的基础,主要阐述信号与系统的基本概念;第2章讲述连续时间信号的分析方法,包括连续时间傅里叶级数表示和连续时间傅里叶变换分析;第3章讲述连续时间系统的基本概念和分析方法,包括拉普拉斯变换及在连续时间系统分析中的应用;第4章讲述离散时间信号的分析方法,包括离散时间傅里叶级数分解和离散时间傅里叶变换分析,还重点阐述了联系连续与离散的奈奎斯特抽样定理;第5章讲述离散时间系统的基本概念和分析方法,包括 $z$ 变换及在离散时间系统分析中的应用。第6、7章是信号与系统基础知识的两个典型应用,第6章主要讲述离散傅里叶变换及其在频谱分析方面的应用,第7章主要讲述数字滤波器系统的结构、功能和软件设计方法。本书强调理论知识和实践应用的共同学习,鉴于MATLAB软件工具在全球范围使用广泛而且其信号处理工具箱功能完善,在每章最后均配有MATLAB相关函数及实例,不仅有利于学生理解概念,也有利于促进学生轻松上手编写代码,达到能学懂、会应用的目的,更好地将所学理论与实践应用相结合,十分有益于工程实践能力的培养和训练。

本书第1、5、6、7章、4.3节、前言及附录由张晓青编写,第2章、4.1、4.2、4.4节由耿蕊编写,第3章由王君编写,全书由张晓青组织策划并统稿。天津大学曾周末教授对本书的内容编排提出了宝贵意见和建议,北京信息科技大学祝连庆教授审阅了

本书并提出了宝贵意见和建议，在此谨向他们表示衷心的感谢！研究生李杰、胡蒋明协助完成了本书的校对和作图工作，在此也向他们表示衷心的感谢！

本书在编写过程中参考了国内外很多经典教材和著作，已列于参考文献中，部分例题和习题取自这些文献，编者在此向收录于参考文献中的各位作者表示衷心的感谢！限于学识水平，书中难免存在错误和缺点，恳请广大读者批评指正。

编 者

## 本书符号体系一览表

符 号	名 称
$\delta(t)$	单位冲激信号
$\delta(n)$	单位抽样信号
$u(t)$	单位阶跃信号 (连续)
$u(n)$	单位阶跃信号 (离散)
$x(t)$	一般连续时间信号
$x(n)$	一般离散时间信号
$T_s, T$	抽样间隔 (抽样周期)
$T, \omega_0$	连续时间信号的基本周期, 基频
$N, \Omega_0$	离散时间信号的基本周期, 基频
$N$	离散时间信号的长度
$X(j\omega)$	$x(t)$ 的傅里叶变换
$X_k$	$\tilde{x}(t)$ 的傅里叶级数系数
$X(e^{j\Omega})$	$x(n)$ 的离散时间傅里叶变换
$\bar{X}(k)$	$\tilde{x}(n)$ 的离散时间傅里叶系数
$X(s)$	$x(t)$ 的拉普拉斯变换
$X(z)$	$x(n)$ 的 $z$ 变换
$X(k)$	$x(n)$ 的离散傅里叶变换
$x(t), x(n)$	系统输入
$y(t), y(n)$	系统输出
$h(t)$	单位冲激响应
$h(n)$	单位脉冲响应
$y_{ss}(t), y_{ss}(n)$	正弦稳态响应
$y_{zi}(t), y_{zi}(n)$	零输入响应
$y_{zs}(t), y_{zs}(n)$	零状态响应
$y_n(t), y_n(n)$	自然响应
$y_f(t), y_f(n)$	强迫响应
$H(j\omega)$	连续时间系统的频率响应
$ H(j\omega) $	连续时间系统的幅频响应 (幅频特性)
$\varphi(\omega)$	连续时间系统的相频响应 (相频特性)
$H(e^{j\Omega})$	离散时间系统的频率响应
$ H(e^{j\Omega}) $	离散时间系统的幅频响应 (幅频特性)
$\varphi(\Omega)$	离散时间系统的相频响应 (相频特性)

## 本书常用缩写词表

缩 写	英文全称	中文名称
CTFS	Continue Time Fourier Series	连续时间傅里叶级数
CTFT	Continue Time Fourier Transform	连续时间傅里叶变换
DTFS	Discrete Time Fourier Series	离散时间傅里叶级数
DTFT	Discrete Time Fourier Transform	离散时间傅里叶变换
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform	离散傅里叶反变换
FFT	Fast Fourier Transform	快速傅里叶变换
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	快速傅里叶反变换
LTI	Linear Time Invariant	线性时不变
IIR	Infinite Impulse Response	无限长脉冲响应
FIR	Finite Impulse Response	有限长脉冲响应

## 本书采用的时频变换对符号表

名 称		符 号		
		正 变 换	反 变 换	变 换 对
傅里叶变换	统一表示式	$\mathcal{F}\{\}$	$\mathcal{F}^{-1}\{\}$	$\longleftrightarrow$
	连续时间傅里叶级数	CTFS $\{\}$	CTFS <sup>-1</sup> $\{\}$	$\tilde{x}(t) \xleftrightarrow{\text{CTFS}} \tilde{X}_k$
	连续时间傅里叶变换	CTFT $\{\}$	CTFT <sup>-1</sup> $\{\}$	$x(t) \xleftrightarrow{\text{CTFT}} X(j\omega)$
	离散时间傅里叶级数	DTFS $\{\}$	DTFS <sup>-1</sup> $\{\}$	$\tilde{x}(n) \xleftrightarrow{\text{DTFS}} \tilde{X}(k)$
	离散时间傅里叶变换	DTFT $\{\}$	DTFT <sup>-1</sup> $\{\}$	$x(n) \xleftrightarrow{\text{DTFT}} X(e^{j\Omega})$
	离散傅里叶变换	DFT $\{\}$	DFT <sup>-1</sup> $\{\}$	$x(n) \xleftrightarrow{\text{DFT}} X(k)$
	快速傅里叶变换	FFT $\{\}$	FFT <sup>-1</sup> $\{\}$	$x(n) \xleftrightarrow{\text{FFT}} X(k)$
拉普拉斯变换		$\mathcal{L}\{\}$	$\mathcal{L}^{-1}\{\}$	$x(t) \xleftrightarrow{\mathcal{L}} X(s)$
z 变换		$\mathcal{Z}\{\}$	$\mathcal{Z}^{-1}\{\}$	$x(n) \xleftrightarrow{\mathcal{Z}} X(z)$

# 目 录

## 前言

## 本书符号体系一览表

## 本书常用缩写词表

## 本书采用的时频变换对符号表

第1章 信号与系统基础知识	1
内容提要	1
1.1 信号与系统的定义	1
1.1.1 信号的定义	1
1.1.2 系统的定义	2
1.1.3 域的概念	4
1.1.4 本课程的性质和特点	6
1.2 信号的分类及典型信号	7
1.2.1 信号的分类	7
1.2.2 典型的连续时间信号	10
1.2.3 典型的离散时间信号	13
1.3 信号的基本时域运算	14
1.3.1 信号的相加和相乘	15
1.3.2 信号的微分和积分	15
1.3.3 信号的平移、翻转和展缩	16
1.3.4 信号的简单分解	17
1.4 系统的分类及常用表示方法	19
1.4.1 系统的分类	19
1.4.2 系统的常用表示方法	22
1.5 MATLAB 编程及上机实践	27
1.5.1 MATLAB 软件简介	27
1.5.2 上机实践举例	31
习题一	32
第2章 连续时间信号分析	35
内容提要	35
2.1 连续时间周期信号的傅里叶级数	35
2.1.1 连续时间周期信号的傅里叶级数表示	35
2.1.2 连续时间周期信号的频谱与功率谱	39
2.1.3 连续时间傅里叶级数的性质	41
2.2 连续时间信号的傅里叶变换	42
2.2.1 傅里叶变换的导出与非周期信号的频谱	42

2.2.2 常见信号的傅里叶变换	44
2.2.3 连续时间傅里叶变换的性质	48
2.3 MATLAB 编程及上机实践	53
2.3.1 与本章有关的 MATLAB 函数举例	53
2.3.2 上机实践举例	55
习题二	57
第3章 连续时间系统分析	59
内容提要	59
3.1 系统的时域分析	59
3.1.1 微分方程的建立与求解	59
3.1.2 单位冲激响应的意义	63
3.1.3 卷积积分	64
3.2 系统的频域分析	66
3.2.1 系统频率响应的定义	66
3.2.2 系统频率响应与零状态响应	67
3.2.3 正弦稳态响应	68
3.3 拉普拉斯变换	69
3.3.1 拉普拉斯变换的定义及收敛域	69
3.3.2 拉普拉斯变换的性质	71
3.3.3 拉普拉斯反变换	74
3.4 系统的复频域分析	76
3.4.1 微分方程的复频域求解	76
3.4.2 系统函数	77
3.4.3 零极点图及系统特性分析	78
3.5 MATLAB 编程及上机实践	81
3.5.1 与本章有关的 MATLAB 函数举例	81
3.5.2 上机实践举例	81
习题三	84

第4章 离散时间信号分析	86
内容提要	86
4.1 离散时间傅里叶级数	86
4.1.1 周期信号的离散时间傅里叶级数表示	86
4.1.2 离散时间周期信号的频谱	87
4.1.3 离散时间傅里叶级数的性质	89
4.2 离散时间傅里叶变换	93



4.2.1 离散非周期信号的傅里叶变换	93
4.2.2 离散时间傅里叶变换的性质	96
4.3 奈奎斯特抽样定理	102
4.3.1 理想抽样的数学模型	103
4.3.2 奈奎斯特抽样定理	104
4.3.3 抽样信号的重建	107
4.3.4 实际抽样过程	108
4.4 MATLAB 编程及上机实践	110
4.4.1 与本章有关的 MATLAB 函数 举例	110
4.4.2 上机实践举例	111
习题四	113
<b>第 5 章 离散时间系统分析</b>	<b>115</b>
内容提要	115
5.1 离散时间系统的时域分析	115
5.1.1 差分方程的建立与求解	115
5.1.2 零输入响应和零状态响应	119
5.1.3 卷积和	121
5.2 离散时间系统的频域分析	125
5.2.1 系统频率响应	125
5.2.2 正弦稳态响应	127
5.2.3 系统频率响应的分析	127
5.3 $z$ 变换	129
5.3.1 $z$ 变换的定义及收敛域	129
5.3.2 基本 $z$ 变换对	130
5.3.3 $z$ 变换的性质	133
5.3.4 $z$ 变换与拉普拉斯变换的关系	137
5.3.5 $z$ 反变换	139
5.4 离散时间系统的复频域分析	142
5.4.1 差分方程的 $z$ 域求解	142
5.4.2 系统函数	145
5.4.3 零极点图与系统特性分析	147
5.5 MATLAB 编程及上机实践	150
5.5.1 与本章有关的 MATLAB 函数 举例	150
5.5.2 上机实践举例	152
习题五	154
<b>第 6 章 离散傅里叶变换及应用</b>	<b>156</b>
内容提要	156
6.1 离散傅里叶变换	156
6.1.1 离散傅里叶变换的定义	156
6.1.2 离散傅里叶变换的性质	162
6.1.3 快速傅里叶变换	171
6.2 离散傅里叶变换的应用	172
6.2.1 基于离散傅里叶变换的信号 频谱分析	172
6.2.2 基于离散傅里叶变换的 LTI 系统实现	181
6.3 MATLAB 编程及上机实践	184
6.3.1 与本章有关的 MATLAB 函数 举例	184
6.3.2 上机实践举例	185
习题六	189
<b>第 7 章 数字滤波器设计</b>	<b>190</b>
内容提要	190
7.1 数字滤波器的基本概念及分类	190
7.1.1 数字滤波器的基本概念	190
7.1.2 数字滤波器的分类	195
7.2 IIR 数字滤波器设计	196
7.2.1 IIR 数字滤波器分类	196
7.2.2 IIR 数字滤波器设计方法概述	200
7.2.3 模拟滤波器设计	201
7.2.4 模拟滤波器转化为数字滤波器 的方法	210
7.2.5 IIR 数字滤波器的结构实现	215
7.3 FIR 数字滤波器设计	219
7.3.1 FIR 数字滤波器的线性相位 特性	219
7.3.2 窗函数法设计 FIR 数字 滤波器	224
7.3.3 FIR 数字滤波器的结构实现	233
7.3.4 IIR 数字滤波器与 FIR 数字 滤波器的比较	234
7.4 MATLAB 编程及上机实践	236
7.4.1 与本章有关的 MATLAB 函数 举例	236
7.4.2 上机实践举例	240
习题七	244
<b>附录</b>	<b>246</b>
附录 A 与本书有关的著名科学家简介	246
附录 B 常用数学公式	247
附录 C MATLAB 常用命令函数	252
附录 D MATLAB 信号处理工具箱常用 函数	260
<b>参考文献</b>	<b>263</b>

# 第 1 章 信号与系统基础知识

## 内容提要

本章讲述信号与系统知识体系的基本概念，是学习后续章节的基础。首先介绍信号的定义、系统的定义以及域的概念，介绍信号与系统分析中重要的时域、频域以及复频域 3 种坐标系；其次讨论信号的分类以及典型信号，信号的相加、相乘、分解以及合成等基本时域运算规则；然后介绍系统的分类和常用表示方法；最后介绍 MATLAB 软件的入门使用方法，并列举与本章有关的部分典型函数、实例代码和运行结果。

## 1.1 信号与系统的定义

### 1.1.1 信号的定义

#### 1. 消息和信息

信息是人类社会和自然界中需要传送、交换、存储和提取的抽象内容。由于信息是抽象的内容，为了传送和交换它，必须用语言、文字、图像和数据将它表达出来。人们称表示信息的语言、文字、图像和数据等为消息。消息是信息的载体，信息是消息中蕴含的尚未确定的内容。消息中所包含的预先不确定的内容就是信息，消息中不确定内容越多，信息量就越大。

#### 2. 信号

如果把消息以物理量的形式表现出来，如用发光强度、电压、声波、位移、速度、加速度、温度、湿度和颜色等代替消息，则构成了信号。因此，信号就是消息的某种物理表现形式，是信息的载体，是反映信息的物理量。

概括地讲，信息是抽象的；消息是具体的，但不是物理的；而信号则既是具体的，又是物理的。信号是信息的载体，但信号不是信息，只有对信号进行分析和处理后，才能从信号中获取信息。信号、消息与信息的关系可理解为借助某种信号形式，传递各种消息，使受信者获取不同的信息。信号无处不在，在人们生活的这个世界里到处都充满了信号，无论是来自自然的还是人们发出的。例如，在人们说话时气压的变化、一天中气温的高低，以及心脏产生的周期性心电信号等。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，常见的形式有声、光、电、力等。

信号的概念广泛地出现在各个领域，如图 1.1 所示。常见信号有很多，例如红绿灯、上下课铃声、电压、电流、磁通、温度、压力、压强、机械振动、价格、经济指数、股市指数、流量、水位、潮位和人体生理信号等。信号有很多分类方法，例如，根据信号的物理属性，可分为电信号、光信号和声信号等；根据信号的能量状况，可分为能量信号和功率信号，等等。除了这些有用信号以外，还有一类信号往往伴随有用信号产生，甚至淹没有用信

号,使得后续的信号分析和处理过程变得相当复杂,它们就是噪声。限于篇幅,本书不会过多讲述噪声方面的内容。

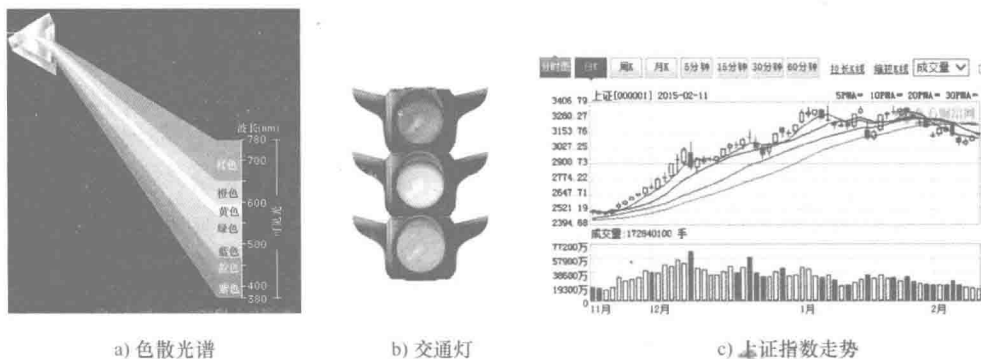


图 1.1 常见信号的例子

实际上,获取信号需要利用传感器和传感设备。传感器的种类繁多,形式不一,主要有物理型、化学型和生物型等,其中物理型(热、光、磁、电、声、力)传感器是人们获取信号的最主要手段。例如,利用晶体或陶瓷的压电效应测量力、形变、位移、速度、振动和风速等,或利用光敏半导体测量光强度、光通量、光照度等,利用光纤可制成电磁量、力学量、温度和图像等传感器。

总之,信号是信息学科研究的最基本内容,它具有下面几个重要特征:

- 1) 物理上,信号是反映信息变化的形式。
- 2) 数学上,信号是一个或多个自变量的函数。
- 3) 自变量可以是时间、位移、周期、频率、幅值和相位等各种物理量。

### 1.1.2 系统的定义

信号是物理量,要产生信号,要对信号进行产生、存储、转化、传输和处理,需要一定的物理装置,这样的物理装置称为系统。因此,系统是存储、转化、传输和处理信号的设备,是对输入信号做出响应的物理结构。广义上讲,系统是由各不相同但彼此影响的单元有机地集合起来实现某个总目标的一种组合,对给定的信号做出响应而产生另外的信号,其简单框图如图 1.2 所示。

系统的本质是对输入信号(激励)进行处理,并将处理后的信号作为系统的输出,即产生系统的响应。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;电视机是一种视频信号播放系统;手机是一种收发并处理多种传输信号的便携式电子系统,等等。



图 1.2 系统及其输入输出信号简单框图

无论在自然科学还是社会科学中,大至天体宇宙、人类社会,小至生物细胞、原子结构,都存在信号与系统的应用研究问题。信号与系统的概念与人们所处的世界息息相关,存在于人民生活、工农业生产、航空航天以及国防科技等领域的各个方面。图 1.3 所示为一个

傅里叶变换光谱仪的实例。傅里叶变换光谱技术主要通过双光束干涉产生干涉图，并利用傅里叶变换将干涉图转换为光谱图。

在此系统中，激光源输出包含多个波长（即多个频率）的光信号，经耦合器1

分成两束，经过光程调节后在耦合器2发生干涉，干涉输出信号被光电探测器检测，然后经A-D转换器转换后送入计算机进行频谱分析，最后在计算机终端显示屏上得到该激光源的光谱分布图。光学信号处理的核心是马赫-曾德尔干涉仪，如图1.3中点画线框所示。设定激光源所包含的波长个数后再进行仿真，系统所得的干涉图与光谱图如图1.4所示。

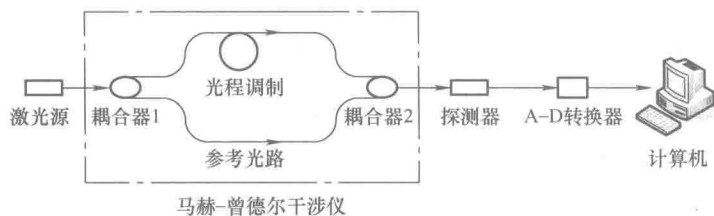


图 1.3 光纤傅里叶变换光谱仪系统的基本组成

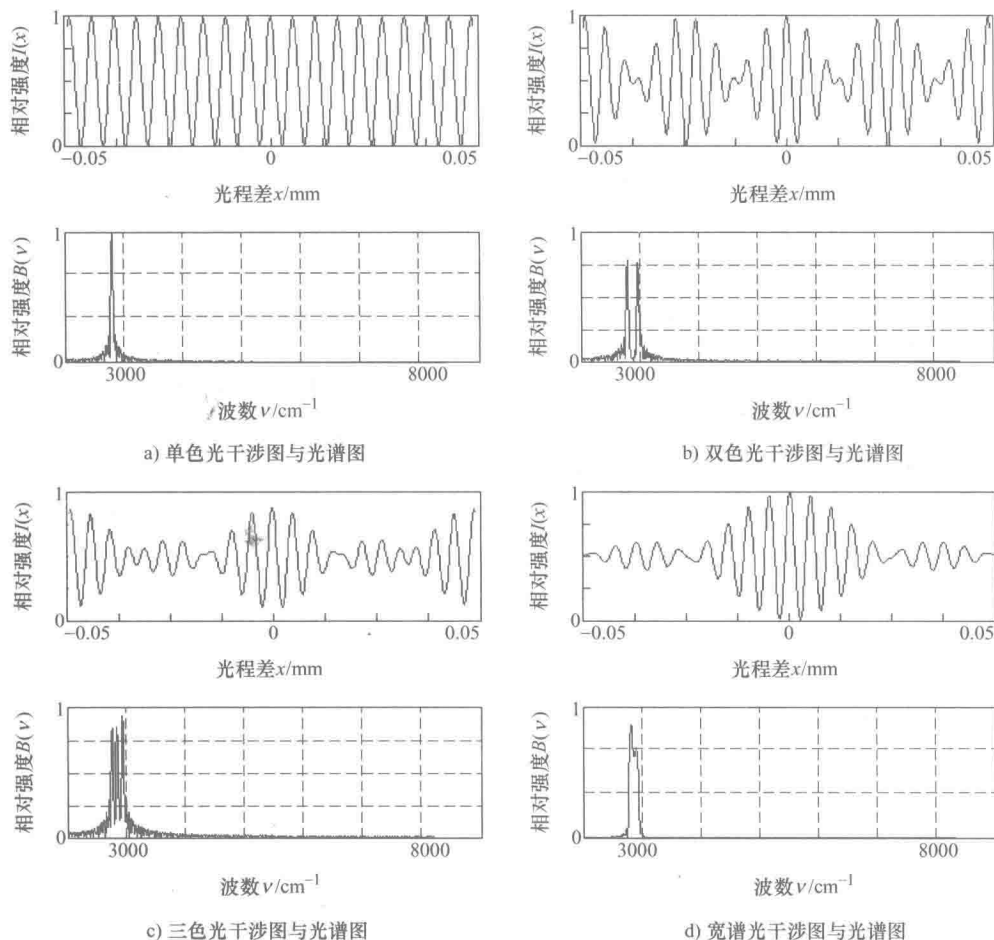


图 1.4 干涉图信号与光谱图信号

信号与系统是两个密切相关的概念。在电路中随时间变化的电流或电压是信号，电路本身是一个系统，而电路对输入信号的响应是输出信号；在汽车中，驾驶人脚踩加速踏板产生

压力使汽车加速,这时加速踏板上的压力是信号,汽车本身是一个系统,汽车在油门板加压力下产生加速度是响应,也就是输出信号;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密切相关。虽然系统一词包罗万象,种类和大小不一,但在对输入信号做出响应这一点上是相通的。不同领域信号与系统的物理属性和表现形式各不相同,但都具有两个基本的共同点,即:①信号总是一个或几个独立变量的函数,该函数一般都包含了关于某些现象或性质的信息;②系统总是对给定的信号做出响应而产生另外的信号。

### 1.1.3 域的概念

关于“域”字,《现代汉语词典》有如下解释:①在一定疆界内的地方,如区域、地域等;②泛指某种范围,如音域、时域、频域等。在信号与系统理论体系中,所谓的域指的是信号所在的研究范围,实质上就相当于坐标体系,人们将信号或系统放入该坐标体系中进行研究。

#### 1. 时域

时域指的是人们直接体验的时间变化,是人类时时刻刻感知的域。因为人类的经历都是在时域中发展和验证的,所以人们已经习惯于事件按时间的先后顺序发生。人们周围的世界以时间贯穿,因此,以时间作为自变量是各个科技领域中常用的方法。以时间作为轴线分析函数及研究对象的方法称为时域分析。时域是一个数学或物理词汇,表示以时间为轴线、以时间为标尺。时域分析是描述数学函数或物理信号对时间的关系。例如一个信号的时域波形可以表达信号随着时间的变化。

对于一般的时域信号,若是离散时间信号,则时域中的函数或信号在各个离散时间点的数值均为已知;若是连续时间信号,则函数或信号在任意时间的数值均为已知。在研究时域信号时,常会用示波器将信号转换为时域的波形进行观察。

数学上,信号是一个或多个变量的函数;信号函数的自变量可以是多种类型的物理量,如时间、位移、周期、频率、幅值、相位等。一般情况下,信号是时间的函数,但也可以是其他自变量的函数。由于信息蕴涵于变化的信号中,只有变化的物理量才能运载信息,因此,信号是带有信息的随时间变化的物理量。一般地,信号的数学模型就表示为时间函数  $x(t)$  或  $x(n)$ 。正弦信号的时域图形如图 1.5 所示。

信号具有以下几个特性:时间特性、频率特性和能量特性。信号的时间特性是从时间域对信号进行

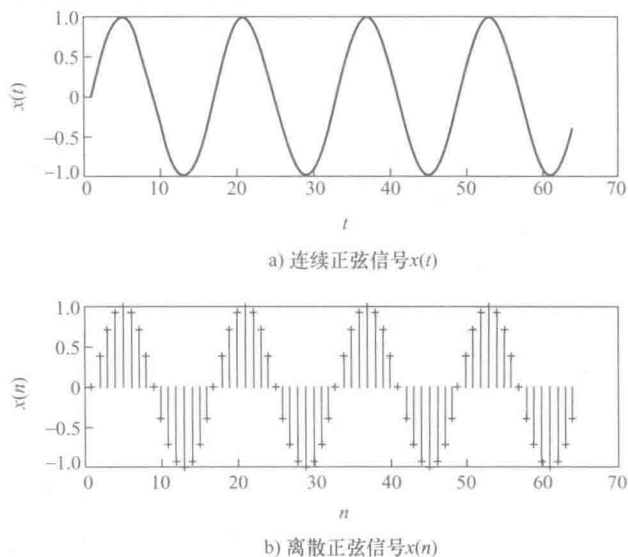


图 1.5 正弦信号的时域图形

分析。一般地,信号是时间的函数,具有一定的时域波形。任意一个信号具有其自身特有的频率组成成分,所以信号也是频率的函数。另外,信号也具有能量属性,因为任何信息传输的过程都必然伴随着一定的能量传输。

时域分析法直接分析时间变量函数,研究信号和系统的时域特性。

## 2. 频域

信号的频率特性是从频率域对信号进行分析。如果一个信号函数的自变量是频率,即用横轴表示频率,用纵轴表示该频率信号的幅度,就得到通常说的频谱(Spectrum)图。频谱图描述了信号的频率结构、频率与该频率信号幅度的关系。对信号进行时域分析时,有时一些信号的时域参数相同,但并不能说明信号就完全相同。因为信号不仅随时间变化,还与频率、相位等信息有关,这就需要进一步分析信号的频率结构,并在频域中对信号进行描述。频率轴的标注可以是频率 $f$ (单位为Hz),也可以是模拟角频率 $\omega$ (单位为rad/s),还可以是数字角频率 $\Omega$ (单位为rad)。这几个频率参量将贯穿全书,在后面的章节中将多次使用它们。

动态信号从时域变换到频域主要通过傅里叶级数和傅里叶变换实现,时域周期信号借助傅里叶级数转换到频域,如图1.6所示,时域非周期信号借助傅里叶变换转换到频域。可见,时域和频域反映了对信号的两个不同的观测面,它们是两种不同观察和表示信号的方法。信号的时间特性和频率特性有着密切的联系,不同的时间特性对应不同的频率特性。

频域分析法把关于时间的函数转换为关于频率的函数,在频域中对信号和系统进行分析 and 处理。

## 3. 复频域

在信号与系统理论体系中,复频域是指以复变量 $s$ 或 $z$ 的参数作为坐标轴的坐标体系,一般称为 $s$ 域和 $z$ 域。有关这两个复变量转换公式的具体推导将在本书第5章给出,在这里先从数学的角度认识这两个域。

### (1) $s$ 域

复变量 $s$ ,又叫作拉普拉斯算子,其实部用 $\sigma$ 表示,其虚部用 $\omega$ 表示,即

$$s = \sigma + j\omega \quad (1.1)$$

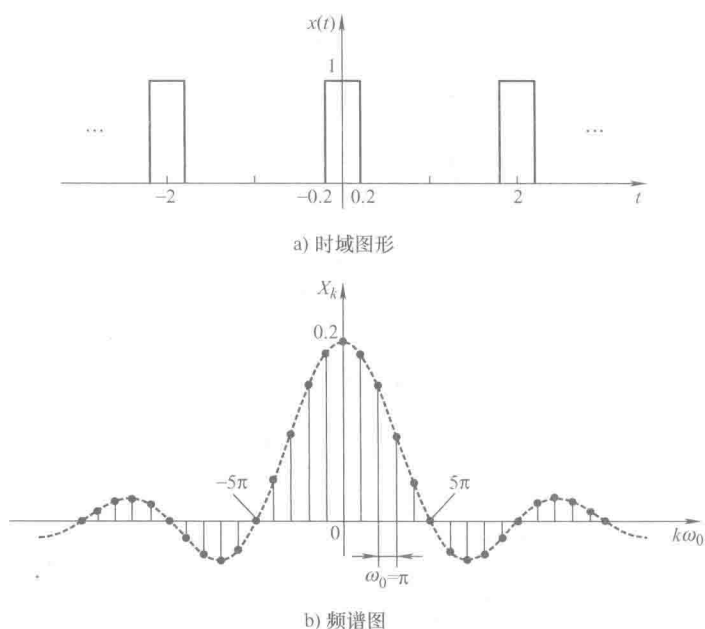


图 1.6 一个周期矩形信号的时域图形与频谱

将平面直角坐标系的横轴设为  $\sigma$  轴, 纵轴设为  $j\omega$  轴, 就构成  $s$  域复平面坐标系, 如图 1.7a 所示。连续时间系统在时域和  $s$  域之间使用拉普拉斯变换和拉普拉斯反变换进行转换。一直以来, 由于人们常常在  $s$  平面研究连续时间系统的各种问题, 因此,  $\omega$  又称为模拟角频率, 量纲是弧度/秒 (rad/s)。

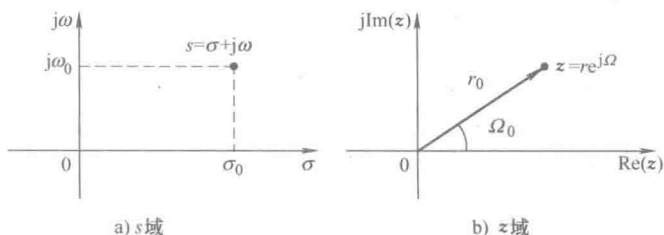


图 1.7  $s$  域和  $z$  域平面示意图

## (2) $z$ 域

复变量  $z$  与复变量  $s$  有所不同, 一般用极坐标形式表示, 其幅值为  $r$ , 其辐角为  $\Omega$ , 即

$$z = r e^{j\Omega} \quad (1.2)$$

实际上,  $z$  域也是一个复平面坐标系,  $z$  的实部对应横轴, 虚部对应纵轴, 如图 1.7b 所示。对于每一个复数  $z$ , 都唯一对应  $z$  平面上一点。离散时间系统在时域和  $z$  域之间使用  $z$  变换和  $z$  反变换进行转换。一直以来, 由于人们常常在  $z$  平面研究离散时间系统的各种问题, 因此, 复变量  $z$  的参数  $\Omega$  又被称为数字角频率, 量纲是弧度 (rad)。

复频域分析法把关于时间的函数转换为关于复变量  $s$  和  $z$  的复频域函数, 可以把时域中的微分和积分运算转化为代数运算, 把卷积、相关运算转化为乘积运算, 在解决信号与系统的实际问题时显得更加简便直观。

## 1.1.4 本课程的性质和特点

### 1. 性质

本课程是信息类学科的一门重要的专业基础课和必修课, 也是许多信息类学科专业的硕士生入学必考科目, 作为一门引导学生跨入信息处理与传输领域的入门课程, 对后续的一些重要专业课起着承上启下的关键作用。

学好信号与系统的知识和技能对于信息类学科及专业的学生来说是极其重要的。信号与系统是从不同的角度来看问题的, 是信号处理中基础的基础。信号与系统概念的许多应用已经有了很长的一段历史, 形成了一整套完整的分析信号与系统的基本方法和基本理论。随着科学技术的迅速发展, 信号与系统的分析方法一直在不断地演变和发展, 对于各个领域的发展起着重要的作用。因此, 人们一直渴望掌握信号与系统理论及应用的各种知识和技能。

虽然在各个不同的领域中所出现的“信号与系统”的物理性质很不相同, 但信号与系统分析的原理和方法是通用的。信号与系统理论及应用的知识和技能, 不仅对于从事测控技术的工作人员是不可或缺的, 对于自控、仪表、机电工程、信息工程、光电工程等专业的工程技术人员以及从事各种科学技术实验研究的人员也都有重要的价值。

### 2. 特点

1) 理论性强, 实践性强, 融数学概念、物理概念和工程概念于一体, 融原理、方法、应用于一体。

努力学习本课程, 解析信号与系统的各个基本原理, 应用信号与系统的多个基本方法,

对培养学生严肃认真的科学作风、理论联系实际工程观点十分重要,对培养科学思维能力、分析计算能力和科学归纳能力都有重要的作用。

2) 连续信号与系统、离散信号与系统并重,加强学生应用能力的培养。

多数科学和工程中遇到的是模拟信号,但是模拟信号处理难以做到高精度,受环境影响较大,可靠性差,且不灵活。随着大规模集成电路以及数字计算机的飞速发展,加之从20世纪60年代末以来数字信号处理理论和技术的成熟与完善,数字(离散)信号处理已基本取代模拟(连续)信号处理。鉴于连续时间信号与系统和离散时间信号与系统之间的密切关系,本书选择以并行的方式来讨论这两种类型的信号与系统。

连续信号与系统、离散信号与系统的概念和方法都有着悠久的历史,在概念上息息相关,但在应用上一直各行其道,连续信号与系统在物理学方面、近代电路理论和通信系统方面的应用很多,而离散信号与系统在数字分析、统计学以及经济学等数据分析中应用广泛。但是在近几十年,随着高速数字计算机、集成电路和尖端高密度器件制造技术等所取得的飞速发展,连续和离散信号与系统产生越来越多的交集,在应用上也日益结合紧密。

3) 内容精炼,注重理论与实践的相辅相成,形成相对完整的知识体系。

本书的内容不仅包含信号与系统的分析,更编排了典型应用的相关章节。由于大多数物理系统可以近似为线性时不变(Linear Time Invariant, LTI)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,因此,限于篇幅,本书只涉及线性时不变系统(以下简称LTI系统)。

本书将从时域、频域和复频域三方面对信号与系统进行分析讨论,强调时域分析与频域分析以及它们之间的对应关系,分析工具包括微分方程、差分方程、傅里叶变换、拉普拉斯变换以及 $z$ 变换等。信号与系统的基本理论、基本分析方法和典型应用案例,为进一步学习和研究通信理论、电路理论、控制理论、信号检测等学科内容奠定一个坚实的基础。

## 1.2 信号的分类及典型信号

### 1.2.1 信号的分类

一般情况下,时间函数 $x(t)$ 是信号的数学模型。在信号理论中,信号和函数两个名词是通用的。在时域中,信号的形式多种多样,根据其主要特征可将信号分为如下几种:确定性信号和随机性信号、连续信号和离散信号、周期信号和非周期信号、功率信号和能量信号等。还有其他一些分类方法,在此不一一列举了。

#### 1. 确定性信号和随机性信号

确定性信号是指能够以确定的时间函数表示的信号,在其定义域内任意时刻都有确定的函数值,如图1.8a所示,又例如电路中的正弦信号和各种形状的周期信号等。本书只讨论确定性信号。所有实际信号在一定程度上都是随机的,没有绝对确定的信号,但如果它在一段时间内的变化规律比较明确,可以近似为确定性信号。随机性信号在某一时刻的取值具有未知性、不确定性,如图1.8b所示,只能通过大量试验测出它在某时刻取值的概率分布。



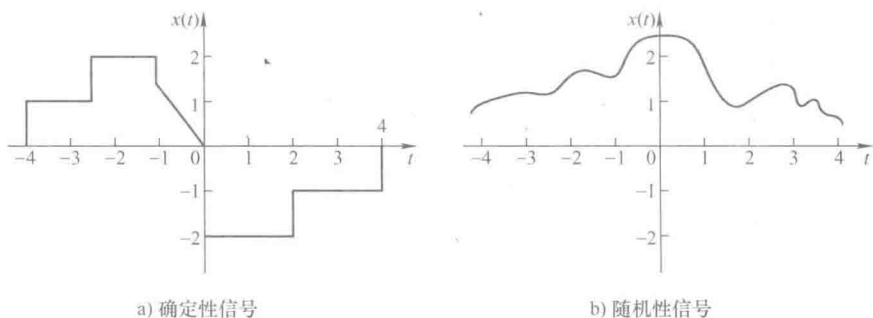


图 1.8 确定性信号和随机性信号

## 2. 连续时间信号和离散时间信号

按照信号自变量取值的连续性, 将确定性信号分为两大类: 连续时间信号和离散时间信号。

连续时间信号是指在信号的定义域内任意时刻都有确定的函数值的信号, 通常用  $x(t)$  或者  $f(t)$  表示。连续信号最明显的特点是自变量  $t$  在其定义域上除有限个间断点外, 其余是连续可变的。如图 1.9a 所示, 常用的指数衰减信号是一个连续时间信号。

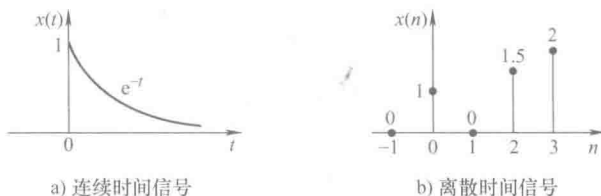


图 1.9 连续时间信号和离散时间信号

离散时间信号是指在信号的定义域内一些离散的时刻有函数值的信号, 如图 1.9b 所示。

应当分别注意到, 信号的自变量可以是连续的, 也可以是离散的; 信号的取值可以是连续的, 也可以是离散的。

如果一个信号, 其幅值是连续的, 而自变量时间是离散的, 则称为抽样信号。它可以看作是在离散时间下对模拟信号的抽样。抽样有时也叫作采样、取样, 英文原词都为 sample。一般的离散时间信号都是由连续时间信号抽样而来的。

通常情况下, 自变量和取值均为连续的信号称为模拟信号, 自变量和取值均为离散的信号称为数字信号。模拟信号是连续信号的特例, 时间和幅度均连续; 数字信号是离散时间信号的特例, 其幅度量化的, 时间和幅度均不连续。由于数字信号在幅度和时间上都是离散的, 可以利用计算机进行处理。根据现代信号处理的情况, 由于计算机运算的位数已达 64 位, 数字信号处理的精度极大提高, 已逐步取代模拟信号处理。

## 3. 周期信号和非周期信号

根据  $x(t)$  是否按一定时间间隔重复, 信号可分为周期信号和非周期信号。一个定义在  $(-\infty, +\infty)$  区间的连续时间信号  $x(t)$ , 如果存在一个最小的正值  $T$ , 对全部  $t$ , 有

$$x(t) = x(t + mT), \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.3)$$

则称  $x(t)$  为周期信号, 其基波周期为  $T$ , 否则称  $x(t)$  为非周期信号。如果为了强调信号的周期性, 一般的连续时间周期信号可以用  $\tilde{x}(t)$  表示。一个连续周期信号如图 1.10a 所示。

一个定义在  $(-\infty, +\infty)$  区间的离散时间信号  $x(n)$ , 如果存在一个最小的正整数  $N$ , 对全部  $n$ , 有

$$x(n) = x(n + mN), \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.4)$$