



国际信息工程先进技术译丛


WILEY

数字信号处理 与滤波器设计

Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design

[美] B.A. 谢诺依 (B. A. Shenoi) 著
白文乐 王月海 胡越 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

数字信号处理与滤波器设计

[美] B. A. 谢诺依 (B. A. Shenoi) 著
白文乐 王月海 胡越 译



机械工业出版社

Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Introduction to Digital signal Processing and Filter Design, ISBN: 978-0-471-46482-2, by B. A. Shenoi, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2014-3075 号。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理与滤波器设计 / (美) B. A. 谢诺依 (B. A. Shenoi) 著; 白文乐, 王月海, 胡越译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 3

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文: Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design

ISBN 978-7-111-58904-4

I. ①数… II. ①B… ②白… ③王… ④胡… III. ①数字信号处理
②数字滤波器—设计 IV. ①TN911. 72 ②TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 003480 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: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧

责任校对: 刘 岚 封面设计: 马精明

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 23.25 印张 · 440 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-58904-4

定价: 139.00 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: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书介绍了数字信号处理与滤波器设计的基础知识,涵盖了信号的分类、时域分析、频域分析、 z 变换、无限冲激响应滤波器、有限冲激响应滤波器、滤波器的实现、滤波器的量化分析、使用 DSP 芯片设计硬件、MATLAB 基础等内容。本书一个吸引人的特点是每个章节的习题都可以使用章节知识内容解决,读者可以通过解答习题充分地理解课程覆盖的知识,同时给读者提供了大量的动手实践参考,有些问题是先理论后例子求解,有些是先解习题后叙述理论,对读者的双向理解会很有帮助。

本书适合通信、电子、计算机等专业的本科生和研究生作为相关课程的参考书和补充教材,也可供相关专业的教师、工程技术人员和其他从业人员参考使用。

译者序

信息技术是当今最具活力的技术之一，相关人才的市场需求量一直迅猛增长。随着大规模集成电路以及数字计算机的飞速发展，用数字方法来处理信号，即数字信号处理技术应用面越来越广，很大程度上直接影响相关技术产品的市场竞争力。数字信号处理是理论性和工程性都很强的学科，学生对数字信号处理专业知识的理解普遍感到困难，其主要原因是理论教学多，理论习题、实验仿真及应用开发三者结合的比较少，目前大部分数字信号处理相关的教材基本可分为：重理论轻习题；轻理论重习题；重应用轻理论三大类，学生往往需要借阅多本教材综合学习消化吸收。本书尝试突出基本概念，以理论公式、数值习题、实验仿真及应用开发相结合的形式呈献给读者，以能高效学习掌握数字信号处理应用综合基础。本书的第1~7章涵盖了离散时间信号、离散时间系统、频域分析、有限与无限滤波器理论与设计、实现结构及量化误差分析等数字信号处理的核心基础，第8章是数字信号处理的硬件实现，是初学者专业兴趣发展的重要导引，第9章是MATLAB信号处理工具箱初级使用。本书一个最大的特点是突出基本概念，在每个章节使用大量数值习题及使用MATLAB的习题解答，给读者提供了大量的动手实践参考，有些问题是先理论后例子求解，有些问题是先解习题后叙述理论，对读者的双向理解会很有帮助。本书另一个吸引人的特点是每个章节的习题都可以使用本章节知识内容解决，读者可以通过解答习题充分地理解课程覆盖的知识点。本书的出版得到国家自然科学基金项目(61371143)、北京高校电子信息类专业群建设项目(PXM2016_014212_000008)的资助，在此表示感谢。

本书概念、公式、习题计算与仿真相结合，深入浅出，适合初级水平学生与工程开发人员使用，同时每个章节增加了适合高水平人员的主题及深入分析的讲解，有利于巩固快速提升。

全书共9章，由北方工业大学白文乐、王月海、李争平副教授，林欣讲师以及研究生胡越进行翻译和校对。其中，林欣负责第1章、第2章、王月海负责第3章、白文乐负责第4章~第8章、李争平负责第9章。胡越、梁东升两位研究生做了初期排版，张咏梅教授、白文乐副教授对翻译整体做了校对，另外对原著中部分公式做了校正。

由于译者水平有限，译文不妥之处在所难免，希望广大读者批评指正。

白文乐
2017年10月

原书前言

本前言为教师以及初学者所作，原因如下：我一直教授本科和研究生二年级的数字信号处理课程长达 25 年，包括其应用和数字滤波器设计课程。在最近的几年来，我不止一次从本科学生中听到有人抱怨，在本课程规定的章节中没有足够的能够理解透彻的数学推导。但是，有些数字信号处理方面的教材比前几年出版的图书有更多的数学推导。然而，这些书籍是为已经入门和研究生层面的学生撰写的，因此初学者会发现这些书中有太多的数学理论，同时他们也对章节末尾中更复杂的问题感到头疼。我一直没有找到一本适合初学者的数字信号处理教材，所以我便以学生为导向，基于我多年的教学经验，写了一本关于数字信号处理及滤波器设计的书以供大家参考。

网络分析是一本由我的博士论文导师 M. E. Van Valkenburg 创作的本科教科书（于 1964 年由 Prentice - Hall 出版社出版），这本书已经成为一本举世闻名的经典著作，不仅是因为它在拥有严谨和美好的数学理论的网络分析方面上囊括了丰富的专题，还因为当学生学习网络分析时，它能够帮助学生以最简单的形式理解基本概念。在我写这本书的同时，该书始终深深影响着我。但是我也不得不时常提醒自己时代在发生变化；网络分析这门课程与数字信号处理的问题也是不一样的。本书不包含上述高级研究生教科书中的许多课题，但这本书的主要特点之一是在每一个章节中，它运用了大量的数学模型以及来自 MATLAB[®]（MATLAB 是 MathWork 公司的注册商标）的函数和信号处理工具箱，来解释基本概念。在讲解理论后，这些问题作为例子进行讲解，或是在书中，先解决问题，随后讲解理论。无论哪种方式，方法的重点在于学生们应该了解基本思想，将工作中的问题作为实现这一目标的手段。在某些情况下，说明的方式并非十分正式。学生将会发现说明会从“注解……”“回忆……”或者“指出……”等开始；它们意味着强调重要的概念和那些句子所表达的结论。许多重要的结果在文中被提及不止一次，或者被总结为了强调它们的意义。

本书的另一特点是在章节末尾给出的所有难题都是能够通过文中知识来解决的。因此当他们成功解决难题时，那些本科生将会因他们理解了涉及课程的原理而感到自信。鉴于此，作者主张要用以学生为中心的方法编写这本书。但是，本科学生应该明白，理解解决问题的能力是重要的，并且理解问题之后的理论是更加重要的。

以下段落是写给那些教授数字信号处理课程的大学讲师的。前 7 章明确涉及

了以下专题：①入门基础，②时域分析和 z 变换，③频域分析，④无限冲激响应滤波器，⑤有限冲激响应滤波器，⑥滤波器的实现，⑦滤波器的量化分析；第8章讨论了硬件设计；第9章介绍了 MATLAB 软件。本书的重点是数字信号处理的基本概念。

大多数的研究生教科书用大量的细节解释有限字长原理，但研究生们在分析关于有限字长下的滤波器频率响应，或者设计在给定字长和量化形式下满足一系列的频率响应要求的滤波器时感到无助。在第7章，我们讨论使用 MATLAB 工具，即为人们所熟知的“FDA 工具”，用来彻底地研究有限字长和不同量化的幅值。这是本书的另一个引人注意的特征，并且这是其他同类书籍所不具备的特征。

当研究生们已经学习了数字信号处理这门课程，或加入设计用于商业用途的 DSP 芯片的数字信号系统时，他们几乎没有任何关于他们所学内容的指导。第8章中的额外内容，那将会是引导学生们学习来实现他们专业发展成功的重要内容。这是用来指引他们未来正确方向、简洁但又重要的材料。尽管有很多关于使用 DSP 芯片的数字系统的硬件实现的书籍，但在 DSP 上编写的指导书几乎不提供任何关于这个问题的指导。仅有少数学校提供关于使用 DSP 芯片构成的数字系统的设计与测试的实验课程。在其标题中包含“数字信号处理”的任何其他教科书中，也没有发现含有本书第8章中的类似内容。然而，第8章不仅包含详尽的硬件实现，还可以作为一个让在行业里开始自己生涯的研究生们不得不去学习的入门教材。

第1章是致力于描述离散时间信号。它描述了数字信号处理的应用软件和定义，定义了几个描述离散时间信号的方法。一些离散时间信号和服从数字信号处理特性的例子都紧随着它们的特性。特别指出，本书给出了复指数的内容和数字滤波器的设计。本章还讨论了数字信号处理相较于连续时域信号处理的优点。

第2章着重于离散时域系统。本章详细讨论了对离散时间信号进行激励的几种建模方法和4种获取离散时间系统响应的方法。用来描述时域下的总体响应有这4种模型：①循环法则，②卷积和，③古典方法，④ z 变换原理。 z 变换理论的用途是将从细节方面和数学举例以及 MATLAB 功能的例证等方面详细地推导出零状态响应、零输入响应、自然响应和应激响应、暂态和稳定响应。在这一章里我们将学习离散时间系统特性、阶跃脉冲响应和变换函数、稳态理论和 Jury - Marden 测试。本书相较于其他教科书，详细介绍了离散时间系统的时域分析。

第3章侧重于频域分析。采样定理的推导之后是离散时间傅里叶变换 (DTFT) 的推导及其在滤波器设计中的重要性。离散傅里叶变换的一些特性和得到的离散傅里叶变换的典型离散信号的例子被包括在许多解释它们的示例中。本章还增加了大量由 MATLAB 函数解决的问题的示例。本章致力于频域分析，其在

许多方面上是不同于其他教科书的。

无线冲激响应滤波器的设计是第4章的主题。本章讨论了模拟滤波器功能近似理论,近似特定频率响应的模拟滤波器设计,冲激变换的使用以及双线性变换。本章将讨论数学实例,并运用 MATLAB 函数来设计滤波器,为学生提供实践经验。

第5章关注的是有限冲激响应滤波器的理论和设计。FIR 滤波器的内容包括线性相位,和通过定义的窗口函数的傅里叶序列来设计此滤波器。本章也讨论等波纹 FIR 滤波器的设计和使用 Remez 交换运算法则。本章包含许多数学模型和 MATLAB 函数用以说明设计过程。

在第4章和第5章学习设计 FIR 滤波器和 IIR 滤波器模型后,学生有必要尽可能地掌握更多的滤波器结构,这样能够让他们研究有限字长对这些结构滤波器频率响应的影响,并选择最好的结构。

在第6章,描述用于实现 FIR 滤波器和 IIR 滤波器几种结构的方案。FIR 滤波器的结构可分为直接型、叠加型和多相位型以及晶格结构及其转置形式。IIR 滤波器的结构包括直接形式、级联、并联结构、网格-耦合全通道结构,以及作为特殊情况的具有自回归(AR)、移动平均(MA)和全通道结构的格子梯形结构。此外,本章包含了大量的数学模型,并使用大量 MATLAB 和 Signal Processing Toolbox 中的函数,这方面本书相比其他教科书在内容上介绍得更加详细。

在第7章讨论了有限字长对第6章中不同结构滤波器频率响应的影响,本书的研究方法与其他教科书有着明显差异。本章没有对有限字长效应进行理论分析,因为它超出了初级课程的范围。作者选择使用一种称为“FDA 工具”的 MATLAB 工具,用于研究有限字长对于不同结构、不同传输函数和用于量化滤波器系数不同格式的影响。除了多种结构的替代选择、传递函数等之外,其他选择,如截断、舍入、饱和度和缩放以找到最佳滤波器结构,使其成为比理论结果更强大的工具。学生会发现使用这个工具的经验比实际硬件实现中的理论更有用。

第1~7章涵盖了数字信号处理的核心课题。第8章关于数字滤波器的硬件实现,简要描述了 Simulink[®]上的数字滤波器的仿真,以及使用 Real-Time Workshop[®]从 Simulink 生成 C 代码(Simulink 和 Real-Time Workshop 是 MathWorks 公司的注册商标),从 C 代码生成汇编语言代码,链接汇编语言代码的单独部分,以生成可在得州仪器公司的 Code Composer Studio 下执行的代码。第8章还包括有关 DSP 开发入门套件、模拟器和仿真器板的信息。第9章,本书的最后一章,介绍了 MATLAB 和信号处理工具箱。

作者建议,前3章讨论数字信号处理的基础知识,可以在第一季度的课程初级阶段进行教学。学习本课程的先决条件是线性、连续时间信号和系统的初级课

程，特别涉及拉普拉斯变换、傅里叶变换和傅里叶级数。第4~7章讨论数字滤波器的设计和实现，可以根据专业课程，在高年级作为选修课程进行教学。教师必须酌情选择课堂上讨论的问题，指出这些问题的真正目的是帮助学生了解理论。有些章节对于初级课程过于难以理解，也会占用过多的课堂时间。这些章节的实例或是通过 Remez 交换算法最小化的目标函数导出，或是用于导出格子梯形实现的公式以及快速傅里叶变换算法的推导。根据我的经验，学生只对使用实现这些算法的 MATLAB 函数感兴趣，因此我删除了最后两个主题的理论阐述，以及 Remez 交换算法中的优化技术的描述。然而，我在书中涵盖了许多使用 MATLAB 函数的例子来解释这些问题。

每章末问题的答案可通过如下网站获得：<http://www.wiley.com/wileycda/wileytitle/productCd-0471464821.html>。他们需要单击网页上“下载软件解决手册”的链接以获得问题答案。在本书出版后，作者很快会把问题的答案及其引申问题发布到网上。

正如本前言开头所提到的，本书是根据我自己在教授数字信号处理初级课程方面的经验编写的。在此，我要感谢达拉斯南卫理公会大学的 M. D. Srinath 博士对本书的审阅，及其对改进本书的建设性意见。我也要感谢我的同事赖特州立大学代顿分校的 A. K. 肖博士。我非常感谢我的妻子苏曼，陪伴我一起完成了这本书的编写。没有她的耐心和支持，我甚至不会开始写作，更不用说完成它了。所以我要把这本书献给她，以及我们的家人。

B. A. Shenoi

2005年5月

目 录

译者序

原书前言

第1章 入门基础	1
1.1 简介	1
1.2 DSP 应用	1
1.3 离散时间信号	2
1.3.1 离散时间信号的建模与性质	7
1.3.2 单位脉冲函数	8
1.3.3 常数序列	9
1.3.4 单位阶跃函数	9
1.3.5 实指数函数	10
1.3.6 复指数函数	10
1.3.7 $\cos(\omega_0 n)$ 的性质	12
1.4 滤波器设计发展史	16
1.5 模拟和数字信号处理	19
1.5.1 移动电话网络的运营	21
1.6 小结	23
习题	24
参考文献	25
第2章 时域分析和 z 变换	26
2.1 线性时不变系统	26
2.1.1 离散时间系统的模型	27
2.1.2 递归算法	29
2.1.3 卷积和	31
2.2 z 变换理论	33
2.2.1 定义	33
2.2.2 零输入和零状态响应	40
2.2.3 系统的线性	41
2.2.4 时不变系统	41
2.3 使用 z 变换求解差分方程	41
2.3.1 z 变换的更多应用	46

2.3.2 固有响应和强迫响应	47
2.4 用经典方法求解差分方程	48
2.4.1 瞬态响应和稳态响应	52
2.5 z 变换方法回顾	53
2.6 卷积回顾	53
2.7 模型转换	58
2.7.1 模型产生回顾	59
2.8 稳定性	63
2.8.1 Jury - Marden 检验	64
2.9 使用 MATLAB 函数求解	67
2.10 小结	77
习题	77
参考文献	91
第3章 频域分析	93
3.1 简介	93
3.2 采样理论	93
3.2.1 带通信号采样	99
3.3 DTFT 和 IDTFT	101
3.3.1 非因果输入的时域分析	104
3.3.2 时移特性	106
3.3.3 频移特性	106
3.3.4 时域反转特性	106
3.4 单位阶跃序列的 DTFT	115
3.4.1 微分特性	116
3.4.2 乘法特性	119
3.4.3 共轭特性	121
3.4.4 对称特性	122
3.5 使用 MATLAB 计算 DTFT	124
3.6 DTFS 和 DFT	131
3.6.1 简介	131
3.6.2 离散时间傅里叶级数	131
3.6.3 离散傅里叶变换	135
3.6.4 由 DFT 重构 DTFT	136
3.6.5 DTFS 和 DFT 的特性	137
3.7 快速傅里叶变换	146
3.8 使用 MATLAB 计算 DFT 和 IDFT	147
3.9 小结	151

习题	152
参考文献	157
第4章 无限冲激响应滤波器	158
4.1 简介	158
4.2 模拟滤波器的幅度近似	161
4.2.1 最大限度平坦和巴特沃斯近似	162
4.2.2 巴特沃斯低通滤波器的设计理论	166
4.2.3 切比雪夫 I 型近似	171
4.2.4 切比雪夫多项式的性质	173
4.2.5 切比雪夫 I 型低通滤波器的设计理论	174
4.2.6 切比雪夫 II 型近似	177
4.2.7 切比雪夫 II 型低通滤波器的设计	178
4.2.8 椭圆函数近似	180
4.3 模拟频率转换	181
4.3.1 高通滤波器	181
4.3.2 带通滤波器	182
4.3.3 带阻滤波器	185
4.4 数字滤波器	186
4.5 冲激不变变换	187
4.6 双线性变换	188
4.7 数字频谱转换	193
4.8 全通滤波器	196
4.9 使用 MATLAB 设计 IIR 滤波器	197
4.10 YULE - WALKER 近似	204
4.11 小结	205
习题	205
参考文献	212
第5章 有限冲激响应滤波器	213
5.1 简介	213
5.1.1 符号	214
5.2 线性相位滤波器	215
5.2.1 线性相位 FIR 滤波器的特性	219
5.3 窗改进傅里叶级数法	223
5.3.1 吉布斯现象	225
5.3.2 窗口函数的使用	226
5.3.3 FIR 滤波器设计过程	229

5.4 使用 MATLAB 设计加窗 FIR 滤波器	233
5.4.1 滤波器阶数估计	233
5.4.2 FIR 滤波器设计	235
5.5 等波纹线性相位 FIR 滤波器	240
5.6 使用 MATLAB 设计等波纹 FIR 滤波器	244
5.6.1 使用 MATLAB 程序设计等波纹 FIR 滤波器	245
5.7 频率采样法	248
5.8 小结	251
习题	253
参考文献	259
第 6 章 滤波器实现	260
6.1 简介	260
6.2 FIR 滤波器的实现	261
6.2.1 FIR 滤波器网格结构	265
6.2.2 线性相位 FIR 滤波器实现	266
6.3 IIR 滤波器实现	268
6.4 并行全通滤波器	275
6.4.1 设计过程	279
6.4.2 网格-梯型实现	280
6.5 使用 MATLAB 实现 FIR 和 IIR 滤波器	281
6.5.1 使用 MATLAB 编程求并行全通滤波器	287
6.6 小结	299
习题	299
参考文献	304
第 7 章 滤波器量化分析	305
7.1 简介	305
7.2 滤波器设计分析工具	306
7.3 量化滤波器分析	310
7.4 二进制数和运算	310
7.5 IIR 滤波器的量化分析	315
7.6 FIR 滤波器量化分析	323
7.7 小结	326
习题	327
参考文献	327
第 8 章 使用 DSP 芯片设计硬件	328
8.1 简介	328

8.2	Simulink 和 Real - Time Workshop	328
8.3	设计准备	330
8.4	代码生成	331
8.5	CCS	332
8.6	仿真器与模拟器	334
8.6.1	Real - Time Workshop 嵌入目标	335
8.7	小结	335
	参考文献	335
第9章	MATLAB 基础	337
9.1	简介	337
9.1.1	向量、数组和矩阵	337
9.1.2	矩阵运算	338
9.1.3	标量运算	343
9.1.4	画图	344
9.1.5	MATLAB 函数	346
9.1.6	数值格式	347
9.1.7	控制流	347
9.1.8	编辑窗口和 M - file	348
9.2	信号处理工具箱	350
9.2.1	信号处理工具箱函数列表	350
	参考文献	359

第1章 入门基础

1.1 简介

我们生活在一个信息化的时代。这种技术大多数是基于数字信号处理(DSP)理论及理论的实现,其中理论的实现是通过嵌入在数字信号处理器(DSP)中的设备完成的。当然,数字信号处理理论及其应用离不开其他学科(如计算机科学与工程),和一些先进技术[如超大规模集成电路(VLSI)芯片设计与制造技术]。目前影响我们生活的数字信号处理设备、系统和应用数量非常大,未来几年有望被引入市场的新设备、系统和应用是无穷的。因此,很难预测数字信号处理的未来和信息技术的影晌。一些当前应用描述如下。

1.2 DSP 应用

数字信号处理应用多个领域,包括以下几点:

1) 电信。无线或移动电话正在迅速取代有线(固定)电话,这两者都连接在一个大型的通信网络上。它们用于语音通信以及数据通信。因此也有计算机连接到进行数据和信息处理的不同网络上。计算机被用于产生、传输和接收大量通过互联网的信息,并且在同一网络将被更广泛地使用,在将来也会被用在语音通信中。这种技术被称为互联网协议语音(VoIP)或互联网电话。除了被归类为多媒体的声音、音乐和其他音频信号,目前我们可以发送和接收有限数量的文本、图形、照片和来自手机的视频图像——因为有限的手机硬件而不是因为已经开发的软件。然而,由于计算机拥有更大的内存和更高的带宽,所以可以更有效地执行相同的功能。目前,市场上已经有开发的无线电话和计算机的无缝集成产品。以上应用的新技术众所周知有CDMA, TDMA, 扩频, 回波消除, 信道编码, 自适应均衡, ADPCM 编码, 和数据加密与解密, 其中一些被用在将要介绍的第三代(3G)手机的软件中。

2) 语音处理。不论是有线电话(固定电话)或是无线(蜂窝)电话在电信网络的实时语音传输质量都是非常高的。语音识别、语音合成、语声验证、语音增强, 文本-语音翻译、语音听写是语音处理的一些其他应用。

3) 消费类电子产品。除了我们已经提到的过蜂窝电话或手机, 消费电子产

品还有高清电视、数码相机、数字电话、录音电话、传真和调制解调器、音乐合成器、录音和音乐信号的混合产生的 CD 和 DVD。在许多家庭里都有环绕声娱乐系统,包括 CD 和 DVD 播放器、激光打印机、复印机和扫描仪。但是电视机、计算机、电话、CD-DVD 播放器、扫描仪在家里作为独立的系统。然而,电视可以像计算机一样用来阅读电子邮件和访问互联网,计算机可以用来调整和查看电视频道,并记录和播放音乐,以及 CD-DVD 数据分享和拨打 VoIP 电话。这种少系统多应用的发展趋势有望在不久的将来加速。

4) 生物医学系统。应用在医院和生物医学的机器的多样性是惊人的。其应用包括 X 光机、MRI、PET 扫描、骨扫描、CT、超声成像、胎儿监测、病人监测, ECG 和 EEC。另一个先进数字信号处理的例子是助听器和心脏起搏器。

5) 图像处理。图像增强、图像恢复、图像理解、计算机视觉,雷达和声呐处理、地球物理和地震数据处理、遥感、气象监测是图像处理的一些应用。对从不同角度拍摄的几张照片进行二维重构和从几张连续切片进行三维重构也已有许多应用。

6) 军事电子。在军事、国防电子系统中的数字信号处理的应用使用了非常先进的技术。其中一些应用是 GPS 和导航、雷达和声呐图像处理、目标检测和跟踪、导弹制导、安全通信、干扰和对策、侦察机的远程控制及电子战等。

7) 航空航天和汽车电子。应用包括飞行器和自动引擎的控制、飞行器飞行性能的监测和控制、导航和通信、汽车的振动分析和防滑控制、飞机的制动控制、悬浮控制、汽车的舒适性等。

8) 工业应用。数控、机器人、发动机控制、制造自动化、安全访问、视频会议,这些都是工业应用。

显然,在不同的设备和系统上这些应用有一些重叠。事实上,在所有的应用和系统中,一些基本操作都是常见的,而这些基本操作将在以下章节中进行讨论。上面给出的许多应用实例并不详尽。一些应用在参考文献 [1] 中有进一步的详细描述。不用说,新应用的数量和对现有应用改善的数量将在不久的将来继续以极快的速度增长。

1.3 离散时间信号

信号将某些物理量的变化定义为有一个或多个自变量的函数,而这个变化包含我们感兴趣的信息。例如,一个连续时间信号周期包含的值中包含基频和谐波,以及各个谐波的振幅和相位角度。信号处理的目的是修改给定信号,使在某种定义好的意义下信息的质量得以改进。例如,在录制音乐的调音台,调整不同的过滤器的频率响应,这样才能提供尽可能高保真质量的整体音频信号(音乐)。注意电话目录或从互联网网站下载的百科全书的内容包含很多有用的信

息，但根据上述定义，其内容不构成信号。当被输入信号激励的时候，正是由于函数和独立变量之间的关系，使得我们能够获得建模信号的方法和找到系统的输出。这也让我们为设计这些系统而寻找方法，这样包含在输入信号中的信息才能改善。

我们把一个连续时间信号定义为一个有连续独立变量的函数。一维连续时间信号 $f(t)$ 被表示为一个时间从 $-\infty$ 到 ∞ 连续变化的函数。但它也可能是一个另一些变量（如温度、压力或海拔）的函数；然而，我们将它们表示成连续时间信号，时间是连续的，但是信号在一些时刻可能不连续。信号可能是时间的实值函数或复值函数。我们还可以把一组连续时间信号定义为从所有时间的值到有相应属性的函数值之间的映射集。只要函数在 $-\infty$ 到 ∞ 的时间域被定义好之后，它在所有的独立变量 t 上都是可微的（除了在有限数量的值）。两个连续时间函数的例子，如图 1.1 所示。

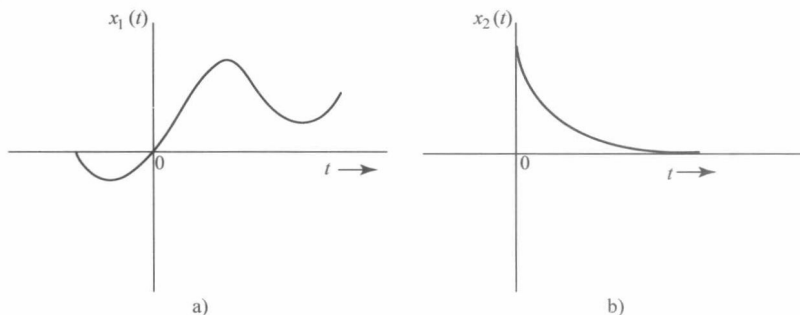


图 1.1 两个连续时间信号样本

离散时间信号是只在离散时间的时刻被定义而在其他值的时间没有被定义的函数。虽然离散时间函数可以在 $-\infty$ 到 ∞ 上的任意时间间隔被定义，但是我们只考虑一个在相同时间间隔被定义的函数，且在 $t = nT$ 被定义，这里 T 是一个以秒为单位的固定时间间隔，被称为采样周期， n 是一个定义在 $-\infty$ 到 ∞ 的整数变量。如果我们把 $f(t)$ 在相同时间间隔 T 上取样，就生成 $f(nT) = f(t)|_{t=nT}$ 的数列。因为 T 是固定的， $f(nT)$ 是只和唯一整数变量 n 有关的函数，因此可以认为是 n 的函数或表示为 $f(n)$ 。连续时间函数 $f(t)$ 和离散时间函数 $f(n)$ 绘制在图 1.2 中。

在本书中，我们将离散时间 (DT) 函数作为一个 DT 序列、DT 信号或 DT 级数。所以 DT 函数是一组从所有整数集到实函数或复函数值的集合的映射。 $f(t)$ 和 $f(n)$ 的值是连续的，在连续范围内可以取任何值，因此即使有无限数字也会有值，例如， $f(3) = 0.4\sqrt{2}$ ，如图 1.2 所示。

零阶保持 (ZOH) 电路用于以周期 T 对连续信号 $f(t)$ 进行采样，前一个时