

数字信号处理引论

基于频谱和滤波器的分析方法

(原书第2版)

詹姆斯·H. 麦克莱伦 (James H. McClellan)

佐治亚理工学院

[美]

罗纳德·W. 谢弗 (Ronald W. Schafer)

斯坦福大学

著 李勇 程伟 译

马克·A. 约德 (Mark A. Yoder)

罗斯霍曼理工学院

DSP First
Second Edition

DSP First

Second Edition

James H. McClellan
Ronald W. Schafer
Mark A. Yoder



机械工业出版社
China Machine Press

数字信号处理引论

基于频谱和滤波器的分析方法

(原书第2版)

詹姆斯·H. 麦克莱伦 (James H. McClellan)

佐治亚理工学院

[美]

罗纳德·W. 谢弗 (Ronald W. Schafer)

斯坦福大学

马克·A. 约德 (Mark A. Yoder)

罗斯霍曼理工学院

著 李勇 程伟 译

DSP First
Second Edition

DSP First

Second Edition

James H. McClellan
Ronald W. Schafer
Mark A. Yoder



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理引论：基于频谱和滤波器的分析方法 (原书第 2 版) / (美) 詹姆斯·H. 麦克莱伦 (James H. McClellan) 等著；李勇，程伟译．—北京：机械工业出版社，2018.5
(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文：DSP First, Second Edition

ISBN 978-7-111-59863-3

I. 数… II. ①詹… ②李… ③程… III. 数字信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 087107 号

本书版权登记号：图字 01-2016-2401

Authorized translation from the English language edition, entitled *DSP First, Second Edition*, 978-0-136-01925-1 by James H. McClellan, Ronald W. Schafer, Mark A. Yoder, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2016, 1998.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by China Machine Press Copyright © 2018.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可，不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签，无标签者不得销售。

本书是模拟和数字信号的经典入门教材。第 2 版延续了第 1 版清晰和直观的风格，介绍基本的数字信号处理概念，重点介绍离散时间信号和系统的内容，包含许多多媒体方面声音和图像处理的新主题，更新了 DSP 操作的 MATALB 函数，还新增了 20 多个 MATLAB 动画演示，以帮助读者更好地理解线性滤波、调幅、抽样原理，提高离散时间滤波及频谱分析等方面的应用能力。

本书适合电子信息工程、计算机工程、通信工程、自动化、信息工程、机械电子工程等相关专业作为教学用书。

出版发行：机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037)

责任编辑：朱 捷

责任校对：殷 虹

印 刷：中国电影出版社印刷厂

版 次：2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

开 本：185mm×260mm 1/16

印 张：20.75

书 号：ISBN 978-7-111-59863-3

定 价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88378991 88361066

投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问：北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科、自动化、人工智能等建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息类、控制类、智能制造类等相关教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

本书的三位作者 James H. McClellan、Ronald W. Schafer 和 Mark A. Yoder 分别来自著名的佐治亚理工学院、斯坦福大学和罗斯霍曼理工学院，他们长期从事数字信号处理理论和应用研究，在学术界和教育界享有盛名。他们还具有在工业界从事信号处理研究的丰富经历。本书是三位作者 20 多年丰富的教学经验和工程应用经验的结晶，凝聚了作者大量的心血和对 DSP 技术透彻的理解，他们对 DSP 物理概念的独特讲解和深刻阐述独树一帜，使得本书特色鲜明、与众不同，是一本难得的优秀教科书。

本书的翻译过程是我们向作者学习的一个过程，虽然译者从事 DSP 教学 20 多年，很多 DSP 理论和知识在教学过程中被多次讲授，但本书对 DSP 基本概念的描述更为准确和清晰，特别是通过 MATLAB 仿真演示和应用实例，对枯燥冗长的理论知识和数学推导所隐含的物理概念进行了形象生动的描述，读后令人印象深刻，相信每一位认真阅读本书的读者都会有亲身感受和深刻体会，获益匪浅。

本书具有如下鲜明特色：

- 内容丰富。本书涵盖了学习 DSP 所需的几乎所有的知识内容——从离散时间信号以及系统的时域和频域分析，到 FIR 和 IIR 滤波器的设计和分析；从 z 变换到傅里叶变换，后者包括离散时间傅里叶变换(DTFT)、离散傅里叶级数(DFS)、离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)；从基本的冲激信号、窗信号和正弦信号分析，到工程领域的音频信号、调制信号的分析。基本概念无一漏缺，内容丰富多彩，可以满足国内大多数工科院校相关专业的教学大纲要求。
- 适应专业面宽。本书可适用于电子信息工程、计算机工程、通信工程、自动化、信息工程、机械电子工程等相关专业的 DSP 课程。不同专业可根据学时要求对内容有所取舍。即使不属于以上专业的读者，甚至零基础的读者，也可以通过阅读本书获得 DSP 的基本知识和概念，为后续学习高级 DSP 内容打下牢固基础。
- 物理概念描述清晰。本书的一大特色是对信号和系统的物理概念描述清晰准确。频域分析概念一直是 DSP 学习中的一个重点和难点，特别是傅里叶变换的物理概念，是频域分析的重要工具和手段。此外，离散傅里叶变换的概念很奇特，对多数学生是一块难啃的骨头。一般教科书对傅里叶变换的描述大多停留在数学定义、性质、公式等简单讨论和一般描述的层次上，而本书采用深入浅出和循序渐进的描述思路，深刻揭示了傅里叶变换的物理概念，结合工程实际信号的傅里叶变换及频域分析，使晦涩难懂的频域分析的理论概念通俗易懂，记忆深刻。
- 资源丰富、手段先进。本书文字流畅、准确，每一个重要概念都有高质量配图，可谓图文并茂。全书精心绘制了超过 220 幅插图，体现了作者的良苦用心和付出的艰辛努力。每一章穿插和附有质量较高的练习和习题。配套的课程网站资源丰富，涵盖了书中重点内容，采用实例演示、电影视频和 Project 实验等多媒体手段，将重点知识和概念进行了形象、有趣和生动的演示，效果突出。通过本书的理论学习、习题练习和实验训练等环节，读者将能够牢固而准确地理解和掌握 DSP 的重要理论知识和物理概念，并将其广泛应用于实际工程领域。

本书主要由李勇和程伟翻译，李勇对全书做了文字统稿。参加翻译工作的还有阮丽华、施歌、杨军华、刘洋、钟雷、蒋华熔、李东、王泽宇、李浩彬、于莹洁、王凤喆、李瑞克、臧柏涛、翟琪、谢小龙、刘晨曦等研究生。西北工业大学外国语学院张弈教授和张

放老师在翻译中给予了很多指导，机械工业出版社王颖老师给予了很大帮助。因此，本书的翻译出版是集体智慧的结晶，在此向所有为本书出版做出努力及提供支持和帮助的人表示衷心感谢！

由于译者翻译水平有限，尽管做了很大努力，译文中仍难免有不妥甚至错误之处，恳请广大读者不吝赐教并指正。译者电子邮箱：ruikel@nwpu.edu.cn。

前言

本书的英文书名为《DSP First》，是《DSP First: A Multimedia Approach》(英文版于1998年出版)的第2版。第1版附带了一张CD-ROM，其中提供了大量的学习资料来扩展传统教科书的范围。2003年，出版了一本名为《Signal Processing First》的书，书中题材论述广泛，包括新增的关于连续时间信号处理和傅里叶变换的四章内容，以及本书第1版前八章的更新内容。2003版出版的这本书的CD-ROM中增加了新的教学素材，所有教辅资源都放在课程网站中，方便读者访问。

这三本书和配套网站都基于作者超过20年的研究工作，这些工作立足于数字信号处理(DSP)技术已成为电子工程和计算机工程的热点研究方向。1993年夏天，James H. McClellan 和 Ronald W. Schafer 开始开发一个学季(one-quarter)课程，旨在作为佐治亚理工学院计算机工程(CmpE)学生的入门先导课程。我们认为数字信号处理主题下包含了未来的计算机工程师在第一年课程学习中需要的一切：它向学生介绍了如何使用数学工具来思考和解决工程问题；学习这门课程为后续课程打下了有益的基础；它建立了系统与数值计算之间紧密的联系，数值计算是实现系统的一种手段；它提供了讨论实际应用的多种工具，应用需求将促使工程师努力把数学和计算与实际问题的解决联系起来。在过去的22年里，从没有发生任何事情改变我们的这一信念。而且，我们在佐治亚理工学院教过6000多名学生，更加坚定了我们的信念。从本质上讲，对电子与计算机工程专业的学生而言，数字信号处理确实是一个非常合适的入门学科^①。事实上，如同本书所述，我们坚信每一个工程和计算机科学专业的学生都需要学习DSP课程。

从一开始，我们相信具有处理真实信号的“动手”经验至关重要，所以，我们大力开发了额外的基于MATLAB平台的实验练习题和项目。在实验作业中，学生可以体验到信号处理的过程及效果，这些过程涉及声音和图像信号处理的实现。例如，他们可以采用正弦信号来合成音乐，但他们也可以看到这些相同的正弦信号是无线系统的基础，通过这些系统可以按流程访问互联网。读者可以通过访问配套网站获得这些体验，并加强和巩固对构成DSP基础的数学概念的理解。

除了25个详细的实验作业之外，配套网站还提供了许多其他学习资料，包括课内的演示、动画，以及数百个习题解答。1995年，Mark Yoder 离开罗斯霍曼来到佐治亚理工学院休假，他设立了这个网站，把所有材料整理到一起以便其他教师(和学生)可以方便地访问和学习。交互式MATLAB演示功能可以演示重要的知识点，例如卷积和频率响应，其中大部分内容现在已经作为实验练习的基础知识。作为教师，所有这些资料改变了我们讲解概念的方式，因为它在数学方程之外扩展了一种理解概念的直观方法。多年来，网站的资源持续增长。未来我们将探索阐述DSP概念的新方法，并希望能超越纸质教材实现电子教材，真正将文字教材的叙述优点和网站的可视化优点融合在一起。

本书(和第1版)的显著特点是，它讲解的信号处理概念与ECE课程的要求是一致的，

① 在我们提出这些思想的过程中，普林斯顿大学 Ken Steiglitz 教授的两本书对我们影响很大：一本是《An Introduction to Discrete Systems》，由 John Wiley & Sons 于 1972 年出版；另一本是《A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Computer Music》，由 Addison-Wesley 出版社于 1996 年出版。Steiglitz 教授的第一本书实际上走在时代的前面，因为那时 DSP 实际应用很少，甚至批处理计算机上可用的简单模拟都需要大量的计算机编程工作量。然而，到了 1993 年，我们可以在像 MATLAB 这样易于使用的软件环境中开展工作，这些基于强大个人计算机的软件广泛应用于实现 DSP 计算。

这也是美国主要大学大二学生(二年级)对课程的要求。本书的重点内容无疑是离散时间信号处理,但是因为要开设一门普遍适合大二学生的课程,所以我们认为必须将信号处理概念和导论理念结合起来。这样考虑的部分原因是,在许多电子工程课程体系中,信号和系统以及 DSP 通常被视为初级和高级课程,一般认为学习这类课程的读者已具有线性电路和线性系统的背景知识。另一方面,我们的方法可使诸如计算机科学和其他工程领域的学生对这一主题有清晰的理解。这一点变得越来越重要,因为非专业人士需要在许多科技领域广泛应用 DSP 技术。

新版的内容。新版的组织结构与第 1 版类似,从第 2 章非常基本的内容开始,该章详细介绍了连续时间正弦信号及其复指数表达形式。虽然这是线性电路课程的典型知识,但本书的内容编排可以使读者更快地阅读其他内容,特别是对那些具有其他专业背景的学生。如果学生已经学过线性电路知识,这一章可以跳过或者快速浏览。第 3 章介绍表达正弦信号之和的频谱概念,该章最后简单介绍了傅里叶级数。虽然第 1 版的第 3 章也有同样的内容,但第 2 版补充了一些新内容^①。

接下来我们进入基于采样正弦信号的离散时间信号的讨论(第 4 章)。我们认为在清晰讲述离散域中这些重要概念时没有必要采用连续时间傅里叶变换,所需的基础知识就是一个简单的三角恒等式: $\cos(\theta + 2\pi) = \cos(\theta)$ 。事实上,在第 2~4 章(除傅里叶级数外)中,我们只需要依赖于正弦和余弦函数的简单数学知识。接下来,我们通过滑动平均系统和其他简单 FIR 滤波器(第 5 章)来引入基本的线性系统概念。通过介绍冲激序列来引出采用冲激响应表达滤波器特性的方法。卷积定义为一种数值运算,它是表达这种思想的第一种形式。频率响应的核心概念用于对 FIR 滤波器的推演和表述(第 6 章)。正弦信号是重点关注的信号,一个滤波器可以用线性时不变系统进行表示,我们会重点讨论这个滤波器被一个正弦信号激励后滤波器输出幅度和相位的变化。

与第 1 版显著不同的是,我们开始引入离散时间傅里叶变换(DTFT)的概念(第 7 章),这自然源自离散时间系统的频率响应。DTFT 反变换除了表示可逆变换,还可以用来描述理想滤波器。然后从 DTFT 自然过渡到离散傅里叶变换(DFT)。DFT 是 DTFT 的简单采样形式,可以通过快速算法进行计算,快速算法很容易得到(第 8 章)。第 7 章和第 8 章完全是新内容,是为了满足广大教师希望把傅里叶变换的强大概念传授给学生的需求,我们认为大二学生完全有能力理解这些概念并付诸应用。这两章论述了实用频谱分析的思想,重点目标是传授可以成功应用频谱分析工具的知识,这些工具很常见,例如 MATLAB 软件平台。

最后两章的内容和第 1 版相同,介绍 z 变换(第 9 章)和 IIR 系统(第 10 章)。学到这个阶段,如果学生认真阅读教材,完成课后作业和实验练习,将有助于理解涉及采样理论、离散时间滤波和频谱分析的应用。而且,他们将会有很好的知识储备来学习线性模拟电路、连续时间信号和系统,以及控制系统的课程。通过本书的学习可以为这些课程奠定基础。

本版新增内容小结

- 第 7 章新增了关于离散时间傅里叶变换(DTFT)的内容,这些内容使读者很容易从频率响应概念转换到傅里叶变换思想的学习。
- 有关理想滤波器和数字滤波器设计的新内容作为 DTFT 的一个应用出现在第 7 章,并且详细介绍了 FIR 滤波器设计的窗函数方法。
- 有关离散傅里叶变换(DFT)的新内容出现在第 8 章,我们将 DFT 看成 DTFT 的一种采样形式,并且阐述了 DFT 和离散傅里叶级数(DFS)的关系。
- 有关频谱分析和谱图的新内容放在了第 8 章的最后几节,它建立了理解信号时频分

^① 此外,对于那些需要深入讨论周期信号的傅里叶分析的教师,附录 C 是关于该主题的完整介绍。

析以及频率分辨率的加窗作用的坚实基础,时频分析一般通过FFT算法来实现。

- 第7章和第8章的内容选自第1版的第9章和《Signal Processing First》的第13章。新版内容做了较大改动,更适合于入门级的学生学习,这有助于学生学习实用频谱分析的思想,通过MATLAB工具对真实信号进行处理的实验可以加强学生对这些概念的理解。
- 扩展了第3章中讨论的频谱,以正式讨论频谱特性(例如时延和频移特性),这些讨论为后续章节的DTFT和DFT学习打下了基础。
- 扩展了第3章中关于傅里叶级数的内容,但是大部分内容放在附录C中。第3章详细讲述了傅里叶级数来展示周期信号的频谱和全波整流正弦信号。附录C为需要强调这一主题的任课教师提供了更深入的素材。对其他周期信号(方波、三角波、正弦波、半波整流正弦波)进行了讨论,包括推导帕塞瓦尔定理并对收敛特性进行深入讨论,对傅里叶级数的性质也做了进一步讨论。
- 章末的习题做了较大更改,书中共有241道习题,其中,83道习题是新补充的,86道习题是第1版中的但做了修改,72道习题和第1版是完全相同的。
- 配套网站包含新的实验、MATLAB演示例子和课后习题解答,网址为 <http://www.pearsonhighered.com/engineering-resources/>。^①

在佐治亚理工学院,大学二年级3学分的课程要求涵盖第2~10章的大部分内容,包括每周两次一小时的讲座、一次1.5小时的习题课和一次1.5小时的实验课。如前所述,我们把重点放在课程实验上,因为我们相信这是激励学生学习信号处理数学知识的必要手段,而且,实验可以引导学生在工程分析和设计中学会使用强大的软件。在罗斯霍曼理工学院,我们在大一学生中采用本书作为10周课程的教学内容,涵盖第1~6章、第9章和第10章。这种模式是每周3次一小时的讲座和一次3小时的实验课。学生在整个课程学习过程中使用MATLAB软件。在斯坦福大学,现在教材的全部内容已经被Schafer作为10周4学分课程的教学内容。由于本课程后是一学季的连续时间信号和系统及线性电路课程,读者可以跳过第2章和第3章,将重点放到其他章节中的离散时间信号和系统内容。其中1学分是通过每周安排不定期的实验课得到的。

我们自身的教学经验表明,本书及其相关的教辅材料可以根据教师的喜好和课程学时以多种不同的方式采用。如同前述讨论所示,本书第2版不是一本普通的信号与系统书,一个区别是包含了大量有关正弦信号和复相量信号的内容。在传统的电子工程课程体系中,在学习信号和系统之前,这些基本概念一般在线性电路范畴内学习。事实上,我们为本书第2版和第1版所起的书名就是为了强调与传统的不同之处。一个重要观点是,讲授信号处理首先开辟了一种讲授线性电路课程的新方法,因为有很多内容能够建立一种平台,帮助我们重新讲解电路课程的重点知识。

本书与传统信号和系统教材的第二个显著不同是更强调有关频域的概念。这意味着,在电子工程课程体系中,像拉普拉斯变换、状态空间和反馈控制等内容,将会在后续线性电路或有关控制系统的高年级课程中讨论。虽然本书明显基于一个特定理念撰写,但是这并不意味着书中内容和配套网站的素材只能用单一方式进行使用。事实上,我们自身的教学经验表明,通过选择合适的主题,本书可作为任何一学季或一学期的信号与系统课程的学习内容,它强调了从频域角度来描述通信和信号处理中的应用。对于大多数电子工程课程,面向控制的专题内容列入另一门课程中。

对于其他专业,例如计算机科学和计算机工程,本书更注重那些和计算紧密相关的信号分析内容。这就如同在其他工程领域,数据采集和频域分析在现代工程分析和设计中扮

^① 关于本书教辅资源,只有使用本书作为教材的教师才可以申请,需要的教师请联系机械工业出版社华章公司,电话13601156823,邮箱wangguang@hzbook.com。——编辑注

演了重要角色。

本书和配套网站凝聚了三位作者、许多同事和学生的大量工作。幸运的是，我们有一批极有才华的学生为本书提供了 MATLAB 的演示内容。这里无法一一提及他们的名字，我们只能感谢他们为本书做出的宝贵贡献。Greg Krudysz 提供的演示程序已经在开发新的演示程序和基于 GUI 的可视化中发挥着主要作用。从 1993 年年初开始，很多教授作为任课教师和习题课老师参与了佐治亚理工学院大二课程 ECE-2025(现在是 ECE-2026)的教学。同样，我们无法在这里提及所有习题课老师，但是在过去 12 年的课程演变过程中，他们的建议和反馈已经赋予了课程新的生机。例如，Pamela Bhatti 开发了一个实验，用来模拟人工耳蜗听觉系统的滤波器组。最近，课程讲授和管理由 Russ Mersereau、Fred Juang、Chin Lee、Elliot Moore、Mark Clements、Chris Rozell、G. K. Chang、David Taylor、David Anderson、John Barry、Doug Williams 和 Aaron Lanterman 共同负责。非常感激他们，他们对本书第 2 版提出了许多积极的建议和改进意见，尤其是有关 DFT 与 DTFT 的新内容。也非常感谢 Wayne Padgett 和 Bruce Black，他们在罗斯霍曼理工学院讲授 ECE-380 课程时提出了很多好的想法。感谢 Ed Doering，他为 ECE-180 课程设计了一整套新实验用于大学一年级学生的 DSP 导论学习。这些实验从传统的音频处理开始，以视频对象跟踪处理结束。

也感谢 Tom Robbins(以前在 Pearson Prentice-Hall)的贡献，他是我们在 ECE 教育中努力推出 DSP 课程的早期支持者。Tom 从一开始就理解和接受本书的理念，并且在项目初期和 2003 年出版那本书的过程中给予了我们鼓励。最近，Andrew Gilfillan 和 Julie Bai 两位编辑为本书第 2 版的出版付出了辛勤的工作。

最后，我们想感谢爱人(Carolyn McClellan、Dorothy Schafer 和 Sarah Yoder)的理解和支持。第 1 章中插入了 Carolyn 的猫 Kilby 的照片(见图 1-3)。多年来，她们贡献了大量的精力和时间持续地支持我们来完成这一项目。

James H. McClellan
Ronald W. Schafer
Mark A. Yoder

目 录

出版者的话
译者序
前言

第 1 章 绪论	1	4.7 习题	75
1.1 信号的数学表示	1	第 5 章 FIR 滤波器	81
1.2 系统的数学表示	3	5.1 离散时间系统	81
1.3 系统的组成框图	4	5.2 滑动平均滤波器	82
1.4 下一步做什么	5	5.3 通用 FIR 滤波器	84
第 2 章 正弦波	6	5.4 单位冲激响应和卷积	88
2.1 音叉实验	6	5.5 FIR 滤波器的实现	94
2.2 正弦和余弦函数简介	7	5.6 线性时不变系统	97
2.3 正弦信号	8	5.7 卷积和 LTI 系统	99
2.4 正弦信号的采样和波形图	11	5.8 级联 LTI 系统	101
2.5 复指数和相量	13	5.9 FIR 滤波示例	103
2.6 相量相加	16	5.10 小结和链接	104
2.7 音叉的物理背景	19	5.11 习题	104
2.8 时间信号：超出公式描述	21	第 6 章 FIR 滤波器的频率响应	107
2.9 小结和链接	22	6.1 FIR 系统的正弦响应	107
2.10 习题	23	6.2 叠加和频率响应	109
第 3 章 频谱表示	27	6.3 稳态响应和暂态响应	110
3.1 正弦波之和的频谱	27	6.4 频率响应的性质	112
3.2 正弦振幅调制	30	6.5 频率响应的图形表示	113
3.3 频谱操作	34	6.6 级联 LTI 系统	116
3.4 周期信号波形	37	6.7 滑动求和滤波	118
3.5 傅里叶级数	41	6.8 采样连续时间信号的滤波	123
3.6 时间-频率谱	45	6.9 小结和链接	127
3.7 调频：啁啾信号	48	6.10 习题	128
3.8 小结和链接	51	第 7 章 离散时间傅里叶变换	132
3.9 习题	51	7.1 DTFT：离散时间信号的傅里叶 变换	132
第 4 章 采样与混叠	57	7.2 DTFT 的性质	139
4.1 采样	57	7.3 理想滤波器	144
4.2 采样与重构的频谱视图	63	7.4 实用 FIR 滤波器	147
4.3 离散到连续的转换	68	7.5 傅里叶变换的性质与变换 对表	152
4.4 采样定理	71	7.6 小结和链接	152
4.5 频闪演示	72	7.7 习题	153
4.6 小结和链接	75	第 8 章 离散傅里叶变换	156
		8.1 DFT：离散傅里叶变换	156
		8.2 DFT 的性质	161

8.3	DFT 中序列 $x[n]$ 的固有时域周期性	167	第 10 章	IIR 滤波器	224
8.4	离散傅里叶变换的性质与变换对表	173	10.1	一般 IIR 差分方程	224
8.5	离散周期信号的频谱分析	174	10.2	时域响应	225
8.6	窗函数	180	10.3	IIR 滤波器的系统函数	230
8.7	谱图	183	10.4	系统函数和框图结构	232
8.8	快速傅里叶变换	191	10.5	极点和零点	234
8.9	小结和链接	193	10.6	IIR 系统的稳定性	236
8.10	习题	194	10.7	IIR 滤波器的频率响应	238
第 9 章	z 变换	198	10.8	三种域	241
9.1	z 变换的定义	198	10.9	逆 z 变换及应用	242
9.2	z 变换的基本性质	200	10.10	稳态响应和稳定性	245
9.3	z 变换和线性系统	201	10.11	二阶滤波器	248
9.4	卷积和 z 变换	204	10.12	二阶 IIR 滤波器的频率响应	254
9.5	z 域和 ω 域之间的关系	208	10.13	IIR 低通滤波器示例	259
9.6	$H(z)$ 变换的零极点	211	10.14	小结和链接	260
9.7	简单滤波器	215	10.15	习题	261
9.8	实用带通滤波器设计	218	附录 A	复数	268
9.9	线性相位滤波器的性质	219	附录 B	MATLAB 编程	279
9.10	小结和链接	220	附录 C	傅里叶级数	289
9.11	习题	221	附录 D	实验项目	313
			术语表		315

这是一本关于信号和系统的书。在这个多媒体游戏电脑、音视频娱乐系统和智能手机的时代，几乎可以肯定的是，你作为这本书的读者，已经对信号和系统形成了某种印象，而且，在日常会话里你可能经常应用这些概念。

很有可能，你对这些术语的领悟和应用在相当宽的含义范围内是正确的，例如，你也许把信号理解成携带某种信息的“事物”。通常来讲，这种事物是某种具有物理量变化的模式，这种物理量可以被物理过程所处理、存储或者传输，例如，语音信号、音频信号、视频或图像信号、生物医学信号、雷达信号和地震信号等。很重要的一点是信号可以采用许多等效的表达形式或方式，例如语音信号可以作为一种声源信号，也可以通过麦克风转换成电信号，然后转换成数字音频记录中的一串数字。

系统这个术语可能有点模糊，需要进一步解释。例如，我们经常所说的“系统”是指一个大型组织，它管理或实施一些过程，如“社会安全体系”或“航空运输系统”。然而，我们感兴趣的是更狭隘的系统定义，它和信号非常紧密地联系在一起。更具体地说，系统是某种为了我们的目的可以操作、改变、记录或传送信号的东西。例如，DVD 碟片采用一串数字存储或表示电影或音乐信号。DVD 播放器就是一种系统，它可以把存储在碟片上的数字(即数字表示的信号)转换成视频信号或声音信号。一般情况下，系统处理信号来产生新的信号或新信号的表达形式。

本书的目的是建立一种架构，基于该架构可以对信号与系统做出准确阐述。具体来说，我们要表明，数学是一种适合描述、理解信号和系统的语言。我们还想表明，信号和系统的数学方程表示能够使我们了解信号和系统如何相互作用，以及我们如何设计和实现系统，以达到预先规定的目标。

1.1 信号的数学表示

信号是表示信息或编码信息的变量形式，许多信号本质上被看成是时间的变量形式。一个熟知的例子是语音信号，它来源于声道中气压变化的形式，当然，这种形式随着时间变化，产生一种时间波形。图 1-1 表示一个语音波形的记录曲线。在图中，纵坐标表示麦克风电压(和气压成正比)，横坐标表示时间。注意图中有四条曲线，分别对应语音波形的四个相邻的时间段，第 2 条曲线是第 1 条曲线的延续，以此类推，每个曲线图对应 50 毫秒的时间间隔。

图 1-1 中的语音信号是一维连续时间信号的例子。这类信号在数学

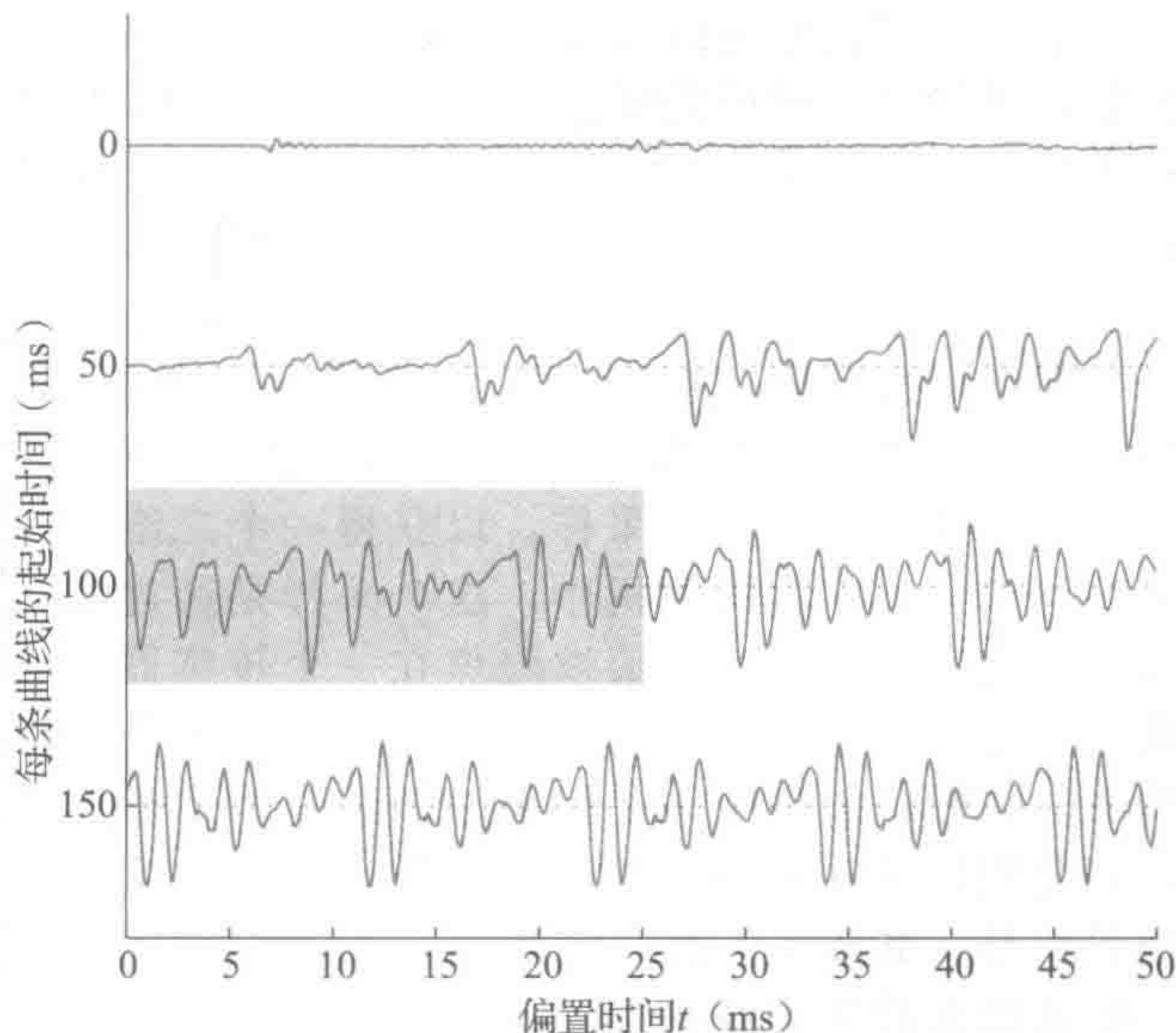


图 1-1 语音信号曲线图。图中每条曲线是上一条曲线的延伸，信号 $s(t)$ 表示为单一变量(时间)的函数，图中阴影部分细节显示在图 1-2 中

上可以表示成单个独立变量的函数，这个变量一般称为时间并用 t 表示。虽然在这个特例中我们无法以我们熟悉的数学函数方式写出一个简单方程来表示图 1-1 中的图形，但我们仍然采用一个函数 $s(t)$ 来关联这幅图。事实上，这幅图本身可以作为一个函数的定义，它指定一个 $s(t)$ 对应每一时刻的时间值(t 的每个值)。

许多信号来源于连续时间信号。但是由于众多原因，当我们阅读本书时，会越来越感到采用离散时间来表示信号是一种更为可取的方式。这种表示可以通过采样连续时间信号实现，离散信号是在相互独立的、等间隔的时间点上对连续时间信号进行采样。其结果是一个数字序列，可以表示为只取整数值的下标变量的函数。离散信号的数学表示为 $s[n]=s(nT_s)$ ，其中， n 是一个整数(即 $\{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$)， T_s 是采样间隔。注意我们按惯例使用圆括号($()$)作为连续变量函数的独立变量的括号，例如信号 $s(t)$ ；使用方括号 $[\]$ 作为离散变量函数的独立变量的括号，例如序列 $s[n]$ 。当然，在图纸或计算机屏幕上画图时，我们常常采用采样方式。我们不能在每一个连续变量点上确定函数值，但可以在一组离散点上确定序列值。直观地看，这些离散点靠得越近，序列就越接近原始连续变量函数的包络。图 1-2 显示了一个短时段离散时间信号，它来自图 1-1 中语音信号的采样，采样周期为 $T_s=\frac{1}{8}\text{ms}$ 。在这个图中，小圆点表示序列 $s[n]$ 的采样值。

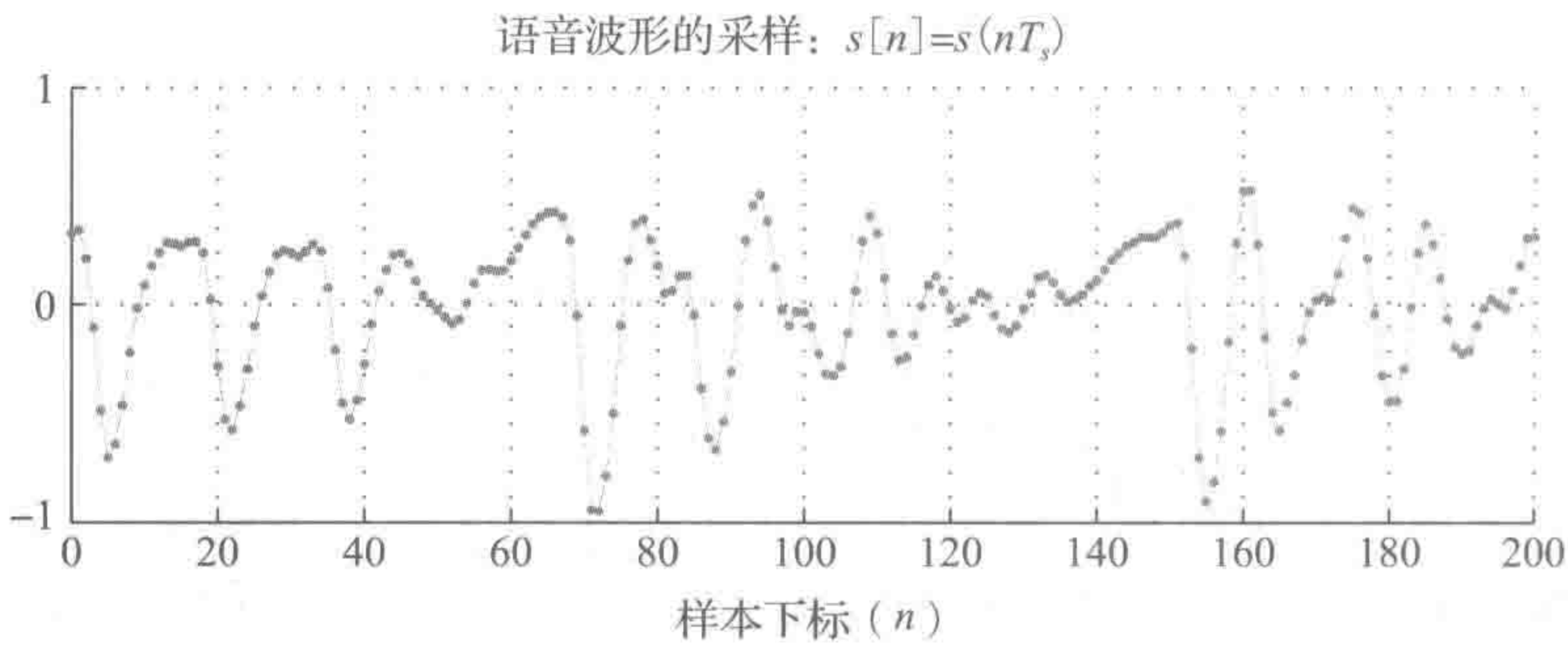


图 1-2 离散时间信号的一维序列表示。序列是一个离散变量 n 的函数。信号样本来自图 1-1 中的阴影区域，图中的连续时间语音信号显示为灰色细曲线

虽然许多信号可以看成是与时间有关的函数形式，但仍有很多信号是与时间无关的。例如，透镜聚光形成的图像是一种空间函数形式，因而可以看成是两个空间变量的函数，这类信号一般定义为两个独立变量的函数[即图像表示为 $p(x, y)$]。照片是信号的另一个例子，图 1-3 显示了一幅灰度图像，图中的 $p(x_0, y_0)$ 表示图像中位置 (x_0, y_0) 处的灰度大小。

图 1-3 的图像一般看成二维连续变量信号，因为空间一般认为是连续的。然而，同样可以对二维连续变量信号进行采样，以获得一个二维离散变量信号。在数码相机中，这个采样是通过记录光值实现的，这些光值被聚焦在一个传感器阵列上，这个传感器阵列由几百万点阵或百万像素构成。在彩色照相机中，将有三个独立的传感器阵列分别用于采样并记录 RGB 的红、绿、蓝三原色信号。如图 1-3 的二维灰度图像可以表示为二维离散变量序列或一个二维阵列值，采用符号 $p[m, n]=p(m\Delta_x, n\Delta_y)$ 表示，其中， m 和 n 仅取整数值， Δ_x 和 Δ_y 分别表示水平和垂直采样间隔。



图 1-3 两个空间变量函数所表示的信号例子

二维函数是静态图像的一种适当的数学表示形式，不随时间变化；另一方面，视频是随时间变化的图像，这将需要增加第三个独立变量表示时间，所以视频信号将被表示为 $v(x, y, t)$ 。在模拟电视信号中，时间是离散的(30 帧/秒)，每个水平线(x)是连续的，但扫描水平线的数量是有限的，所以 y 是离散的。在目前的数字视频信号中，信号是离散的图像序列，因此视频信号 $v(x, y, t)$ 的三个变量都是离散的。

本节的主要目的是介绍信号的数学函数表示的思想。虽然我们很快就会看到许多熟悉的函数对于学习信号和系统知识是非常有益的，但我们并不打算去详细说明这一点。我们唯一关心的是建立函数和信号之间的联系，在这一点上，函数将简单地作为表示信号的一种抽象符号。因此，现在可以称“语音信号 $s(t)$ ”或“采样图像 $p[m, n]$ ”。尽管这似乎不是非常重要的，但我们在下一节中将看到，它确实是迈向我们目标非常重要的一步。我们的目标就是采用数学方法来系统地描述信号和系统。

1.2 系统的数学表示

正如我们已经描述的，系统的含义是把一个信号转换成一个新信号或不同的信号表示。这是一个比较模糊的定义，但对于初学者它是有用的。更具体地说，一维连续时间系统需要输入信号 $x(t)$ ，并产生相应的输出信号 $y(t)$ ，可以用数学表示为

$$y(t) = \mathcal{T}\{x(t)\} \tag{1-1}$$

这种表示的含义是输入信号(波形、图像等)经过系统(用操作符 $\mathcal{T}$ 表示)处理来产生输出信号 $y(t)$ 。这种描述开始听起来很抽象，用一个简单例子举例说明就不难理解了。假设有一个系统，输出信号是输入信号的平方，这个系统的数学描述可以简单写成

$$y(t) = [x(t)]^2 \tag{1-2}$$

上式表示在每一时刻，系统的输出值等于输入信号值的平方。这样的系统在逻辑上可称为“平方系统”。图 1-4 显示了这个平方系统的输出信号是图 1-1 中信号作为输入信号的平方。根据平方运算的性质，我们将会得出，输出信号总是非负的，而且加权了相对较大的输入信号值。

公式(1-2)定义的平方系统是一个简单的连续时间系统例子(即系统的输入和输出都是连续时间信号)。可以建立一个物理可实现的平方系统吗？答案是肯定的，公式(1-2)定义的系统可以通过适当的电路来近似实现。另一方面，如果该系统的输入和输出都是离散时间信号(数字序列)，由下式建立关系：

$$y[n] = (x[n])^2 \tag{1-3}$$

称这个系统是离散时间系统。实现这个离散时间平方系统对于数字计算机而言太简单了，每个信号样本和自身简单进行一次相乘就可以了。

在理解和描述系统时，采用可视化方法表示系统是一种经常采用的手段。为此，工程师使用框图来表示系统操作，这种操作代表了一个系统的实现，而且可以显示复杂系统实现中多种信号之间的相互关系。系统方框图表示的一般形式如图 1-5 所示，这个图简单地表示了信号 $y(t)$ 来自于对信号 $x(t)$ 进行 $\mathcal{T}\{\}$ 操作。

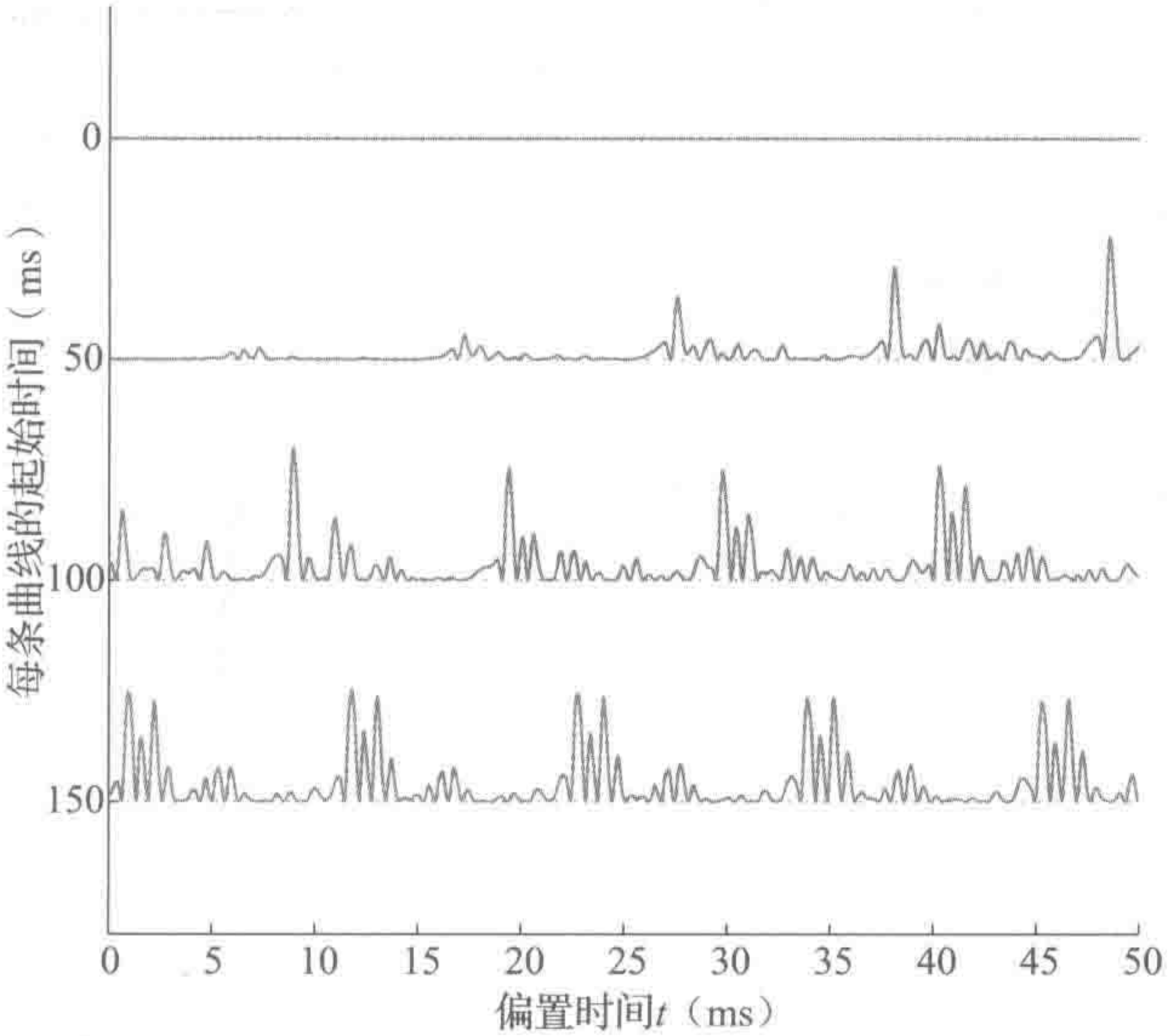


图 1-4 平方系统的输出。输入信号来自图 1-1 的语音信号，平方系统由方程 $y(t)=[x(t)]^2$ 定义

早先讨论连续时间信号与离散时间信号的采样关系时，我们曾提出过系统的一个具体例子。采样器被定义为一个系统，其输入是连续的时间信号 $x(t)$ ，其输出是相应的样本序列，由下列方程定义：

$$x[n] = x(nT_s) \tag{1-4}$$

上式简单说明了采样器每 T_s 秒对连续时间输入信号“提取一个瞬时的样本点”，因此采样操作符合我们定义的系统，可以用图 1-6 的框图表示。我们常常把采样系统称为“连续-离散理想转换器”或理想 C-to-D 转换器。按照这样的思路，对于平方系统，我们给出的系统名称确实符合该系统实际的操作。

1.3 系统的组成框图

框图是一种以简单系统表示复杂系统的有用方法，它更容易理解。例如，图 1-7 是一个表示记录和播放 MP3 音乐的系统框图。该框图将系统的操作分解为四个子系统，每个子系统可以进一步分解成更小的子系统。第一个处理单元是 AD(模-数)转换器，它获取数字音乐波形。AD 转换器是一种物理可实现的近似的理想 C-to-D 转换器(定义如公式(1-4))。AD 转换器产生的有限精度数字信号作为输入信号的样本(量化成有限比特)，而理想 C-to-D 转换器产生无限精度的数字信号。对于高品质音频系统所需的高精度 AD 转换器，尽管 AD 转换器和理想 C-to-D 转换器的差别很小，但这么小的差别非常重要，因为只有有限精度的量化样本值才可以存储在有限容量的数字存储器中。

图 1-7 表示 AD 转换器的输出信号输入到一个可以把信号 $x[n]$ 使用 MP3 压缩算法压缩成更小比特流的系统，这是一个复杂的处理，为了简化，我们把它表示为一个操作。输出是一个压缩的数字信号，可以有效存储在服务器上或传输给用户。当另一个用户有了压缩的数据文件后，MP3 压缩系统必须进行逆处理以解出音频信号。因为 MP3 是一种有损压缩方案，MP3 解码器合成的信号只是原信号的近似。从听觉方面，MP3 的价值是这种近似与原始声音相比几乎没有区别，因为 MP3 编码方法利用了人类听觉的一些特性，舍弃了一些不在音频范围的编码误差。当音乐波形重构为数字信号 $\hat{x}[n]$ 时，最后一个框图实现了从离散时间信号到连续时间信号(声音)的转换，这个过程使用的是 DA(数-模)转换器。该系统输入是有限精度的二进制序列，系统可在序列样本之间进行插值获得一个连续时间函数。然后该连续时间信号被送到其他系统，如放大器、扬声器和耳机，以转换为声音。在第 4 章中，我们将讨论理想 D-to-C 转换器，它是 DA 转换器这一物理器件的理想模型。

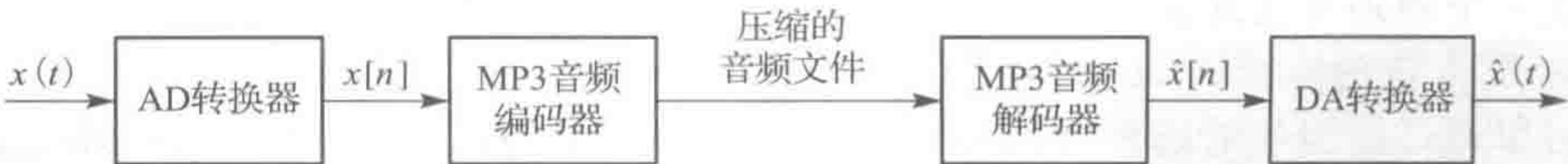


图 1-7 MP3 音频压缩和播放系统简化框图

像 MP3 音频系统这样的例子在我们的生活中随处可见。例如，数码相机因为存储容量因素使用 JPEG 编码方法以减小图像文件大小，JPEG 解码可用于查看图片。大多数时候我们不需要考虑这样的系统是如何工作的，但这个例子说明了采用层次化思想描述一个复杂系统的价值。遵循这样的思路，我们首先了解系统的各个部分，然后了解各部分之间的关系，最后是整个系统。我们从两个方面来分析 MP3 音频系统：首先，从连续时间信号到离散时间信号的转换，然后再回到连续时间信号，这两部分可以和系统的其他部分开考虑。综合这些子系统模块成为一个系统的好处是比较好理解，因为这些模块给实际的音频信号提供了输入和输出接口。其次，某些部分的细节可以弱化，例如让 MP3 的专家为 MP3 编码器和解码器子系统做更详细的分解描述。事实上，这些系统涉及许多信号处

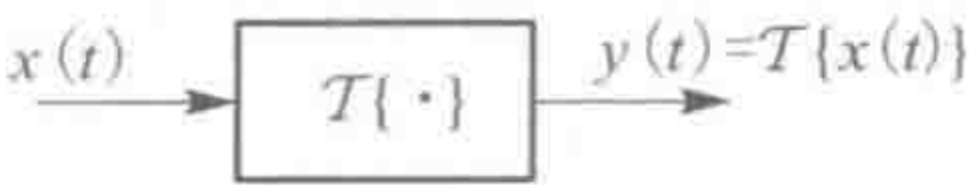


图 1-5 连续时间系统框图

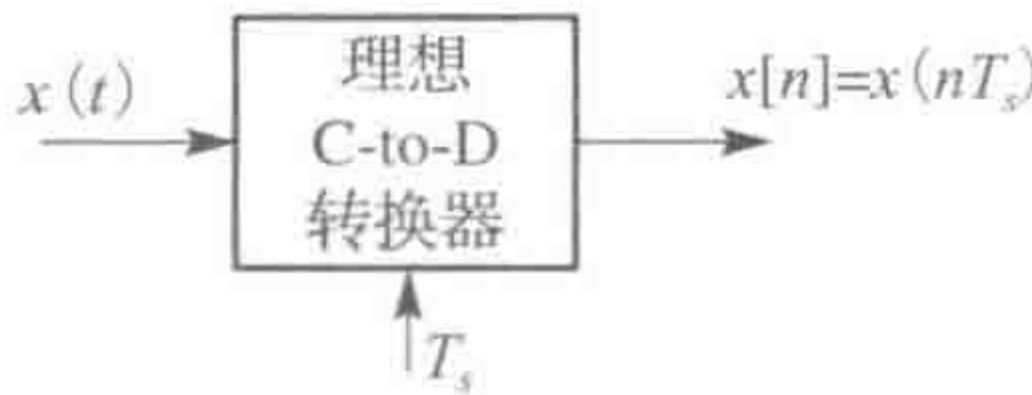


图 1-6 采样器框图

理操作，可以通过连接若干典型的 DSP 模块对这些操作予以说明，本书将研究这些 DSP 模块。

1.4 下一步做什么

MP3 音频编码系统是相对复杂的离散时间系统的一个很好的例子。图 1-7 框图隐含着许多离散子系统和离散信号。尽管我们不承诺对所有的 MP3 编码器或其他任何复杂系统的技术细节进行解释，但我们的确希望能为读者打下理解离散时间和连续时间信号和系统的基础，使得这方面的知识可以用于对更复杂系统组成的理解。在第 2 章，我们将从基本的数学基础开始讨论，说明大家熟悉的、来自于三角函数的正弦和余弦函数是如何在信号与系统理论中发挥基础作用的。接下来，我们将讨论如何用复数简化三角函数代数的内容。随后的章节介绍信号的频谱概念以及基于线性时不变系统的滤波概念。如果你能在本书学习中勤于习题解算、亲自完成演示题目，并在课程网站上动手完成实验练习(标有图标)，你将会有沉甸甸的收获，将掌握和理解许多关键概念，它们是现代信号处理技术的基础。



注释

课程网站包含许多实验、演示和课后作业及解答。