



普通高等教育规划教材

数字信号处理

钱同惠 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

数字信号处理

主编 钱同惠

参编 李 利 刘 勤

主审 沈其聪

机械工业出版社

本书系统地讨论了数字信号处理的基本理论、基本算法、基本分析与实现方法。全书共九章,第一章综述了数字信号处理学科的研究对象、内容、特点以及应用领域;第二、三章介绍了离散时间信号与系统的基本理论,离散时间信号与系统的时域特性、离散傅里叶变换及其快速算法、 z 变换;第四~七章讨论了数字滤波器的基本理论、设计方法和结构特点;第八章分析了数字信号处理的有限字长效应;第九章简述了基于 MATLAB 的数字信号处理软件分析平台和基于 TI 公司的 TMS320C54x 系列的 DSP 硬件实现方法。

本书结构合理、叙述简洁、层次清晰、图文并茂、例题丰富,为了加深初学者对基本理论的理解和对基本方法的掌握,还配有多种形式的实践题,包括习题上机实验题和综合思考题。

本书可作为高等院校电子信息工程、通信工程、自动控制工程、测控技术与仪器等专业的教材,也可作为从事信息处理及相关工作的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/钱同惠主编. 北京:机械工业出版社, 2004.10

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-15415-0

I. 数... II. 钱... III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材
IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 105646 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:王保家 闫晓宇

责任编辑:刘丽敏 版式设计:冉晓华 责任校对:刘志文

封面设计:张 静 责任印制:石 冉

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm $\times$ 1092mm $\frac{1}{16}$ ·17.5 印张·432 千字

定价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育应用型人才培养规划教材

编 审 委 员 会

主 任：刘国荣 湖南工程学院
副主任：左健民 南京工程学院
陈力华 上海工程技术大学
鲍 泓 北京联合大学
王文斌 机械工业出版社

委 员：(按姓氏笔画排序)

刘向东 华北航天工业学院
任淑淳 上海应用技术学院
何一鸣 常州工学院
陈文哲 福建工程学院
陈 峻 扬州大学
苏 群 黑龙江工程学院
娄炳林 湖南工程学院
梁景凯 哈尔滨工业大学(威海)
童幸生 江汉大学

电子与通信类专业分委员会

主任：鲍 泓 北京联合大学
副主任：张立臣 常州工学院
李国洪 华北航天工业学院
委员：(按姓氏笔画排序)
邓 琛 上海工程技术大学
叶树江 黑龙江工程学院
李金平 北京联合大学
沈其聪 总参通信指挥学院
杨学敏 成都理工大学
秘书长：何希才 北京联合大学

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化发展和我国加入WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据IMD1998年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第36位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于2001、2002年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程先驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并作出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息科学的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。⑤工程教育在实践中与经济、产生的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人员,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是:

1. 保证基础,确保后劲

科技的发展,要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此,从内容安排上,保证学生有较厚实的基础,满足本科教学的基本要求,使学生日后具有较强的发展后劲。

2. 突出特色, 强化应用

围绕培养目标, 以工程应用为背景, 通过理论与工程实际相结合, 构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针: 知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为: “精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上, 挑选出最基本的内容、方法及典型应用; “新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容, 以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容, 并将这些内容按新的教学系统重新组织; “广”指在保持本学科基本体系下, 处理好与相邻以及交叉学科的关系; “用”指注重理论与实际融会贯通, 特别是要注入工程意识, 包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

3. 抓住重点, 合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课(专业基础课、专业课)教材的建设, 并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设, 力争做好与之配套的电子教材的建设。

4. 精选编者, 确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验, 又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务, 以确保教材质量。

我们相信, 本套系列教材的出版, 对我国工程应用型人才培养质量的提高, 必将产生积极作用, 会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光, 高瞻远瞩, 及时提出并组织编写这套系列教材, 他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作, 并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件, 在此深表衷心感谢!

编 委 会 主 任 刘国荣教授
湖南工程学院院长

前 言

我们正置身于以数字化、智能化、网络化、综合化、个人化为发展趋势的信息时代中，每天都接触到大量信息，如何更有效地处理与利用信息，已成为人们越来越关注的问题。数字信号处理用数字化手段来处理信息，是现代信息技术的基础。近 40 年来，数字信号处理理论与技术飞速发展，已形成了一门应用非常广泛的交叉和前沿性学科。“数字信号处理”也已成为从事电子、信息以及相关领域的工作人员必须学习和掌握的一门技术基础课。

本书按照普通高等教育应用型人才培养规划教材编审委员会要求，由电子与通信类专业委员会推荐出版。本书可作为电子与通信类工程应用型本科学生学习数字信号处理理论与技术的教材。全书以现代信号处理技术的发展方向和应用为背景，以数字信号为主线，突出数字信号分析与处理系统的基本原理与方法。教材全面、系统地讨论了数字信号处理概貌、离散时间信号与系统的理论与分析方法、离散时间信号与系统的频域分析方法及其特点、数字滤波器设计与实现、数字信号处理软硬件实现平台等。

本书以简明扼要、图文并茂的形式介绍了数字信号处理的基本理论、应用范例和实现方法，精讲理论，重讲实现；基本概念清晰，理论推导简明，体系结构完整，理论与实践紧密结合。全书配有丰富的 MATLAB 图形，每个程序均通过调试，并提供大量实验源程序（联系 Email 为：thqian@126.com）。主要章节结合目前应用广泛的语音信号处理系统，介绍了实际数字信号处理的主要应用；每章都配有实践题，既有理论概念的计算与证明题，又有上机实验与综合思考题。编者力求使读者能快速、直观地掌握数字信号处理的基本体系框架，提高学习兴趣，以体现出应用型人才培养规划教材的特色。

本书共九章，具体内容安排如下：

第一章为数字信号处理概论，介绍该学科的基本框架。该章从数字信号处理的研究对象、研究任务、应用领域、实现方法、发展动态等方面简介数字信号处理学科的概貌和系统组成。

第二章为离散时间信号与系统，叙述离散时间信号与系统的基础理论。内容包括离散时间信号的时域表示、连续时间信号的数字处理方法、典型序列的特点、典型序列的运算和 MATLAB 实现；离散时间系统的定义、分类、描述方法、频域分析和 z 变换。本章涉及序列的离散傅里叶变换、离散时间系统的频率响应与系统函数之间的关系。

第三章为离散傅里叶变换（DFT）及其快速算法（FFT），研究有限长序列的离散傅里叶变换及其快速算法。内容包括离散傅里叶变换（DFT）的定义与性质、DFT 与 z 变换之间的关系，按时间抽选（DIT）的基-2 FFT 和按频率抽选（DIF）的基-2 FFT 算法，并简要介绍了其他 FFT 算法和 FFT 的应用。

第四章为 IIR 数字滤波器的设计与应用，概述滤波器的分类与技术指标、IIR 数字滤波器的设计步骤，并在回顾模拟滤波器设计方法及其 MATLAB 实现的基础上，讨论由模拟滤波器（AF）设计 IIR 数字滤波器（DF）的冲激响应不变法和双线性变换法、直接在数字域中设计 IIR 数字滤波器的方法，最后分析 IIR 数字滤波的频率变换法和各种 IIR 数字滤波器

的 MATLAB 辅助设计方法。

第五章为 FIR 数字滤波器设计与应用, 介绍具有线性相位的 FIR 数字滤波器的设计条件与特点, 重点叙述基于窗函数法、频率取样法、最优化法等 FIR 数字滤波器的设计思路和设计方法, 比较 IIR 与 FIR 数字滤波器的特点及其适用场合。

第六章为几种特殊的数字滤波器, 介绍全通滤波器、最小相位系统与最大相位系统、梳状滤波器、采样率转换的滤波器。

第七章为数字滤波器结构, 主要介绍包括 IIR 数字滤波器的直接型、级联型、并联型三种基本网络结构, FIR 数字滤波器的直接型、级联型、线性相位型、频率采样型、快速卷积型五种基本网络结构。

第八章为数字信号处理中的有限字长效应, 讨论量化误差的影响。内容包括定点、浮点量化误差的表示, A/D 转换量化噪声分析、数字滤波器系数量化分析、量化误差对 FFT 的影响。

第九章为数字信号处理实现方法简介, 简要介绍基于 MATLAB 的数字信号处理软件实现平台的使用和基于 TMS320C54x 的 DSP 硬件实现平台的使用方法。

本书由钱同惠任主编, 李利、刘勤参编。第一、四、五、六章以及第二章的第二、三节由钱同惠编写, 第二章的其余节和第三章由刘勤编写, 第七~九章由李利编写。全书由钱同惠统稿。沈其聪教授审阅了全部初稿, 并提出了具体的修改意见。

在本书编写过程中得到了普通高等教育应用型人才培养规划教材编审委员会电子与通信类专业分委员会的认真指导, 还得到了侯群、任先平老师和武陵、万丽芬等同学的支持和帮助, 在此向他们表示衷心感谢!

由于作者水平有限, 不妥与错误之处在所难免, 恳切读者给予批评指正。

编 者

目 录

序

前言

第一章 数字信号处理概论 1

第一节 数字信号处理的任务 1

一、数字信号处理的研究对象 1

二、数字信号处理系统的基本组成 2

三、数字信号处理的作用 4

第二节 数字信号处理的学科概貌 7

一、数字信号处理的理论基础 7

二、数字信号处理学科的主要内容 8

三、数字信号处理的特点 8

第三节 实践题 9

一、习题 9

二、上机实验题 9

三、综合思考题 10

第二章 离散时间信号与系统 11

第一节 离散时间信号 11

一、序列——离散时间信号的时域表示 11

二、连续时间信号的数字处理方法 11

三、序列的分类 16

第二节 典型序列及特点 16

第三节 序列的运算及 MATLAB 实现 21

一、序列的相加、相乘 22

二、序列的移位、翻褶与尺度变换 22

三、序列的卷积和 23

四、信号的能量和功率 25

第四节 离散时间系统 25

一、离散时间系统的定义 25

二、离散时间系统的分类 26

三、线性移不变离散时间系统的时域描述 28

第五节 离散时间信号和离散时间系统的频域分析 31

一、序列的傅里叶变换及性质 31

二、周期序列的离散傅里叶级数 (DFS) 与傅里叶变换 38

三、序列傅里叶变换与模拟信号傅里叶

变换之间的关系 42

四、离散时间系统的频率响应 43

五、序列的 z 变换及性质 45

六、离散时间系统的系统函数与频率响应之间的关系 57

第六节 实践题 60

一、习题 60

二、上机实验题 63

三、综合思考题 64

第三章 离散傅里叶变换 (DFT) 及其快速算法 (FFT) 65

第一节 离散傅里叶变换 65

一、离散傅里叶变换 (DFT) 的定义 65

二、DFT 与 z 变换的关系 68

三、DFT 的隐含周期性 69

第二节 离散傅里叶变换的性质 70

一、线性性 70

二、序列的圆周移位 70

三、共轭对称性 72

四、DFT 形式下的帕塞瓦定理 73

五、圆周卷积 74

六、圆周相关 75

七、有限长序列的线性卷积与圆周卷积 76

第三节 DFT 的计算问题及改进途径 78

一、DFT 的计算量 78

二、旋转因子的对称性和周期性 78

三、减小 DFT 计算量的基本思路 79

第四节 按时间抽选 (DIT) 的基-2FFT 算法 79

一、DIT-FFT 算法的基本原理 79

二、DIT-FFT 算法的运算量 81

三、DIT-FFT 算法的主要特点 82

四、算法程序框图与 MATLAB 实现 83

第五节 按频率抽选 (DIF) 的基-2FFT 算法 (桑德-图基算法) 86

一、DIF-FFT 算法的基本原理 86

二、DIF-FFT 算法的主要特点 88

三、DIF-FFT 与 DIT-FFT 的比较	88	特点	151
第六节 快速离散傅里叶变换的反变换 (IFFT)	88	第二节 基于窗函数的 FIR 数字滤波器设计	155
第七节 快速离散傅里叶变换 FFT 其他算法 及其应用	90	一、设计思路	155
一、FFT 其他算法	90	二、设计方法	155
二、应用举例	94	三、各种窗函数	157
第八节 实践题	98	四、窗函数法设计步骤	165
一、习题	98	五、窗函数法计算中的主要问题	167
二、上机实验题	100	第三节 基于频率取样法的 FIR 数字滤波器设计	168
三、综合思考题	100	一、设计思路	168
第四章 IIR 数字滤波器的设计与应用	101	二、设计方法	169
第一节 IIR 数字滤波器及其设计原则	101	三、设计步骤	174
一、滤波器的分类与技术要求	103	第四节 基于最优化的 FIR 数字滤波器设计	174
二、IIR 数字滤波器的设计步骤	105	一、设计思路	174
第二节 模拟滤波器的设计	105	二、设计方法	174
一、巴特沃思 (Betterworth) 低通滤波器	106	第五节 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	180
二、切比雪夫 (Chebyshev) 低通滤波器	110	第六节 实践题	181
三、模拟滤波器的 MATLAB 辅助设计	115	一、习题	181
第三节 IIR 数字滤波器设计	119	二、上机实验题	182
一、由模拟滤波器 (AF) 设计 IIR 数字滤波器 (DF)	119	三、综合思考题	182
二、直接在数字域中设计 IIR 数字滤波器	130	第六章 几种特殊的数字滤波器	183
第四节 IIR 数字滤波器的频率变换	136	第一节 全通滤波器	183
一、数字频率变换法	137	第二节 最小相位系统与最大相位系统	185
二、模拟低通滤波器到各种数字滤波器的转换	141	第三节 梳状滤波器	188
三、各种数字滤波器的 MATLAB 辅助设计	145	第四节 采样率转换的滤波器	189
第五节 实践题	147	一、信号抽取	189
一、习题	147	二、信号插值	191
二、上机实验题	148	三、抽取与插值的应用	193
三、综合思考题	149	第五节 实践题	196
第五章 FIR 数字滤波器设计与应用	150	一、习题	196
第一节 线性相位 FIR 数字滤波器的条件与特点	150	二、上机实验题	197
一、线性相位条件	150	三、综合思考题	199
二、线性相位 FIR 滤波器幅度特性 $H(\omega)$ 的特点	151	第七章 数字滤波器结构	200
		第一节 引言	200
		第二节 数字滤波器结构的信号流图表示	200
		第三节 IIR 数字滤波器的基本网络结构	201
		一、直接型	201
		二、级联型	203
		三、并联型	204
		第四节 FIR 数字滤波器的基本网络结构	208

一、FIR 网络直接型结构	209	第五节 量化误差对 FFT 的影响	230
二、FIR 网络级联型结构	209	一、DFT 计算中的量化误差	230
三、FIR 网络的线性型结构	209	二、定点 FFT 计算中的量化误差	231
四、FIR 网络的频率采样型结构	210	第六节 实践题	233
五、FIR 网络的快速卷积型结构	212	一、习题	233
第五节 实践题	215	二、上机实验题	235
一、习题	215	三、综合思考题	235
二、上机实验题	216	第九章 数字信号处理实现方法简介 ...	236
三、综合思考题	217	第一节 数字信号处理的 (MATLAB) 软件	
第八章 数字信号处理中的有限字长		实现平台	236
效应	218	一、MATLAB 简介	236
第一节 引言	218	二、信号处理工具箱函数库	242
第二节 定点量化和浮点量化	219	第二节 数字信号处理的 (TMS320C54x)	
一、定点量化	219	硬件实现平台	250
二、浮点量化	221	一、DSP 芯片的主要特点	251
第三节 A/D 转换量化噪声分析	222	二、TMS320C54x 数字信号处理器的结构	
一、A/D 转换量化噪声的定义	222	原理	252
二、量化噪声通过线性系统	224	三、TMS320C54x 指令系统与软件设计 ...	258
第四节 数字滤波器系数量化效应分析	225	四、TMS320C54x 开发环境	260
一、滤波网络中系数的量化效应	225	参考文献	268
二、滤波网络中运算的量化效应	226		

第一章 数字信号处理概论

本章从数字信号处理的研究对象、研究任务、应用领域、实现方法、发展动态等方面简要介绍数字信号处理学科的概貌和系统的组成，从而使读者对该学科的基本框架有一个初步了解。

第一节 数字信号处理的任务

信息科学是研究信息的获取、传输、处理和利用的一门科学。信号是信息的物理表现形式，信息用一定形式的信号来表示，才能被传输、处理、存储、显示和利用。

信息技术的发展趋势是数字化、智能化、网络化、综合化、个人化，其中信息数字化是其他“四化”的基础，而对数字信息进行处理则是一个非常重要的方面。我们每天接触到的CD机、声卡、数字化影像、数码照相机以及手机等都有不同形式数字信号处理系统。

一、数字信号处理的研究对象

数字信号处理（DSP，Digital Signal Processing）是用数字或符号的序列来表示信号，通过计算机或通用（专用）信号处理设备，用数字的数值计算方法处理这些序列，以达到提取和应用有用信息的目的。

信号是信息的载体，它将信息从一处携带到另一处。例如，交通红绿灯是信号，它传递了“红灯停，绿灯行”的信息。载体不同，信号的形式不同。信号可以是电的、磁的、声的、光的、机械的、热的等。例如，人们可以通过感受到的压力或光强度的变化来获取声音信息或图像信息。人们听到的声音就是耳膜感觉到的压力变化，所看到的图像就是视网膜感受到的光强度的变化。这些信号都是模拟信号（Analog Signal），它们在时间、幅值上是连续的。单词 away 的语音信号波形如图 1-1 所示，图中纵坐标为单位电压。

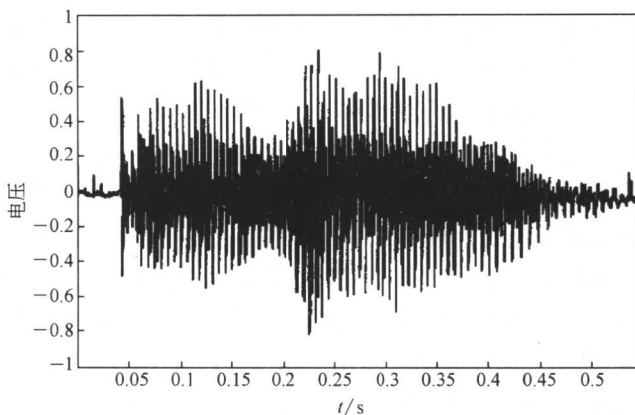


图 1-1 单词 away 的语音信号

信号的自变量可以是时间、频率、空间或其他物理量等。若信号是一个变量的函数，则称为一维信号；信号是两个变量的函数，则称为二维信号；推而广之，若信号是多个变量（空间变量 ≥ 2 个）的函数，则称为多维信号。例如，图 1-1 所示的语音信号是一个变量（这里是时间）的函数，即称之为为一维信号；图像信号是两个变量（空间坐标为 x ， y ）的函数，则称为二维信号。二维信号表示的一幅黑白图像如图 1-2 所示。本书只讨论一维信号。

信号一般都看成是时间的函数,变量的取值方式有连续与离散两种。若变量是连续的,则称为连续时间信号;若变量是不连续的,则称为离散时间信号。信号幅度的取值方式也有连续与离散(常称幅值上的离散为量化)两种。因此,根据变量和幅度的取值方式,信号有四种情况:

- (1) 模拟信号 时间是连续的,幅值也是连续的。
- (2) 脉冲信号 时间是连续的,幅值是离散的。
- (3) 采样信号 时间是离散的,幅值是连续的。
- (4) 数字信号 时间是离散的,幅值是离散的。

其中,模拟信号和脉冲信号又统称为连续时间信号,采样信号和数字信号则称为离散时间信号。

本书主要研究数字信号,但先从离散时间信号——序列的分析与处理着手,而幅值量化后成为数字信号的特点则在第八章“数字信号处理中的有限字长效应”中进行讨论。



图 1-2 静止图像(数码照片)

二、数字信号处理系统的基本组成

要对信息进行处理,必须首先获取含信息的信号。例如,声音可通过麦克风将声信号转变为电信号;图像可通过模拟或数码相机来获得,数字照相机中,物体的光信号产生电荷包,转变为二维栅上的电信号。这些电信号与产生它们的光信号一样,自然都是模拟信号。模拟信号在任意时刻取值,并有无限多个电平,不适合计算机处理。所以在处理前,必须对它们进行采样并转换为数字形式。数字信号(Digital Signal)只在离散的时间上取值,并具有有限个电平,所以非常适合计算机处理。

在大多数实用的数字信号处理系统中,数字信号和模拟信号都会出现。通常系统输入的是模拟信号,需先将模拟信号转换成数字信号,再用基于数字信号处理算法的计算机或专用数字设备进行处理,最后又以模拟信号的形式输出。数字信号处理系统的框图及相关信号波形如图 1-3 所示。输入模拟信号 $x_a(t)$ (如图 1-3b 所示),先经过前置预滤波器,将 $x_a(t)$ 中高于某一频率(称为折叠频率,等于采样频率的一半)的分量滤除,然后在模数转换器中每隔 T 秒(采样周期)取出一次 $x_a(t)$ 的幅度。这一过程就是采样,即将模拟信号的时间离散化。采样后的信号称为采样信号,是离散时间信号,它只表示一些离散时间点 $0, T, 2T, \dots, nT, \dots$ 上的信号值 $x_a(0), x_a(T), \dots, x_a(nT), \dots$ 。A/D 转换器中的量化编码电路再将采样信号变换成数字信号,即用有限位二进制码来表示信号的幅度。如图 1-3c 所示,当采用 4 位码时,只能表示 $2^4 = 16$ 种不同的信号幅度,这些幅度又称为量化电平。经 A/D 转换后的信号为数字信号,如图 1-3d 所示, $x(n)$ 是用量化电平表示的序列数字,自变量 n 是整型变量。数字信号 $x(n)$ 经过数字信号处理系统的核心部分,即数字信号处理器,按照预定的要求进行加工处理,得到输出数字信号 $y(n)$ (如图 1-3e 所示),再经过数模(D/A)变换器,将数字信号序列反过来变换成模拟信号。图 1-3a 中的模拟滤波器滤除信号中不必要的高频分量,平滑成所需的模拟输出信号 $y_a(t)$,如图 1-3g 所示。实际系统并不

一定要包括图 1-3a 中的所有图框。

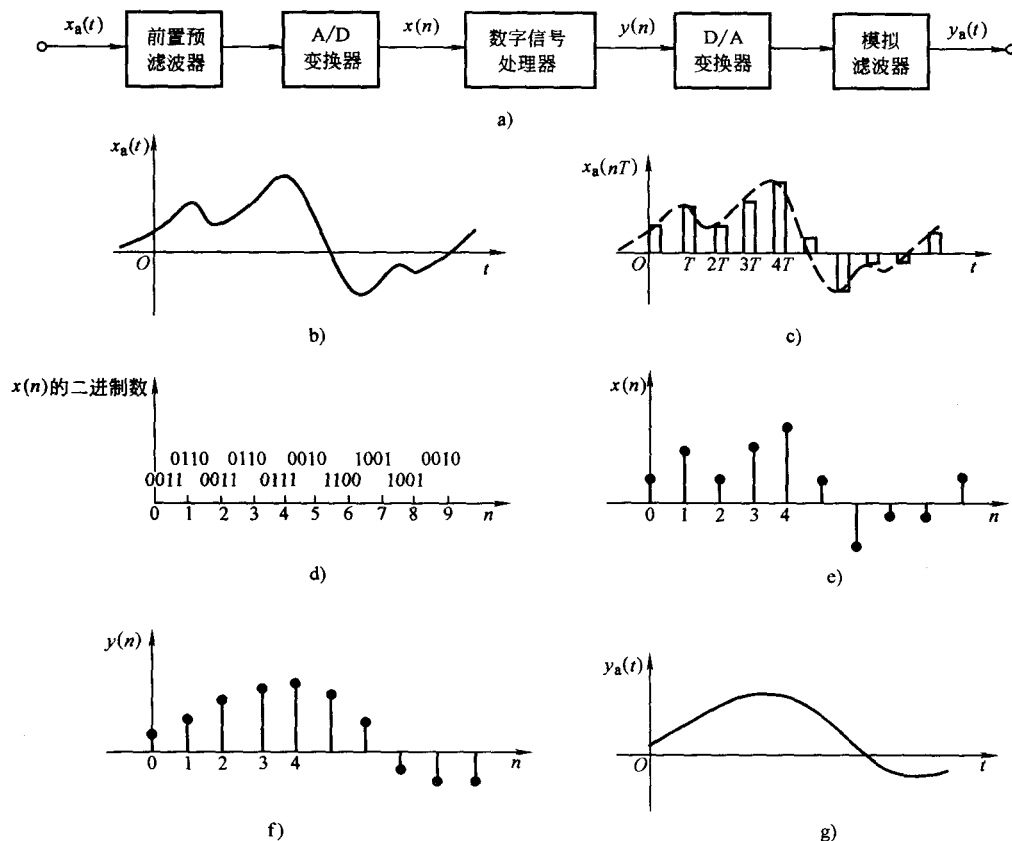


图 1-3 数字信号处理系统的简单框图

a) 数字信号处理系统的简单框图 b) 输入模拟信号波形 c) 采样信号 d) 二进制数字码
e) 量化后的输入信号序列 f) 输出信号序列 g) 输出模拟信号

例如，一个音频系统的组成（如图 1-4 所示）与数字信号处理系统的主要部分基本一样。首先通过一个抗混叠模拟滤波器，从音频信号中去掉所有感兴趣范围之外的频率成分，以便进行采样。然后将采样后的模拟信号转换成一系列的数字代码。为了提高数字录音的质量，经过预模拟滤波和采样之后，数字录音时还将使用各种数字信号处理的方法。例如，增加具有陡滚降特性的数字抗混叠滤波器，数字

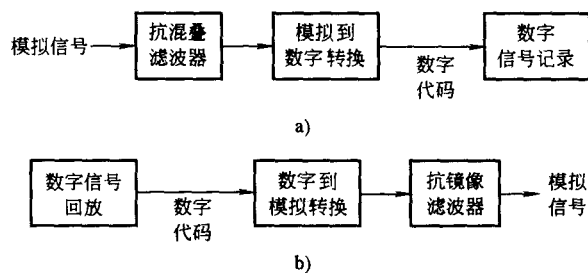


图 1-4 数字音频系统

a) 数字录音 b) 数字回放

滤波器比模拟滤波器能更好更容易地逼近理想滤波器。在数字回放时，从数字代码开始，以去除由 D/A 转换引入的人工痕迹结束，其输出是一个听得见的模拟信号。其中为了从信号中去除高频镜像，增加了高阶数字抗镜像滤波器进行滤波；为了扩大动态范围，用 DSP 实现“压扩”以提高被处理的信号的信噪比，获得满意的话音质量。

类似数字音频系统的数字信号处理系统很多,有 MP3、语音识别、音乐合成、地球物理数据处理、信息加密、电动机控制、蜂窝电话、远程医疗监护、数字摄像机、高速调制解调器等。

三、数字信号处理的作用

数字信号处理中除了将图 1-1 所示的信号转换成数字形式之外,一般还需要对信号的频率进行分析。我们知道,女性的音调通常比男性的高,但对于自动语音识别系统,更重要是语音中的准确频率分量。频谱(spectrum)是对信号中所含频率分量的描述,信号的频谱包括幅度谱和相位谱,通常讨论信号的幅度谱。信号频率分量的大小由该频率处的频谱幅度表示。频谱(幅度谱)是信号中各频率分量幅度随频率变化的函数曲线。因此,频谱是信号的频域(frequency domain)描述,通常用 FFT(快速傅里叶变换)计算。图 1-5 给出了两个不同信号的时域和频域信息,图中纵坐标为电压(mV),横坐标分别为时间(秒)和频率(Hz)。注:本教材的幅频特性图中未注明单位的幅度均为电压单位,相位特性图中相位单位为(度)。在以后的图中均不另外注明。由信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的时域波形可看出 $x_1(t)$ 比 $x_2(t)$ 变化得慢;从它们的频域中可看出,信号 $x_1(t)$ 含有 2 个频率分量,分别用位于 6.7Hz 和 12.7Hz 的两个尖锐谱峰表示;信号 $x_2(t)$ 由 3 个频率分量组成,分别用位于 28.6Hz、38Hz、45Hz 的频谱峰值表示。显然,快变化信号的频率分量比慢变化信号所含的频率分量的频率高(谱峰出现在频谱的右端)。对于每个信号,它的频谱可清楚反映出信号的特性。图 1-1 所示的语音信号的频谱如图 1-6 所示,由图可见,其主要频率分量在 500Hz

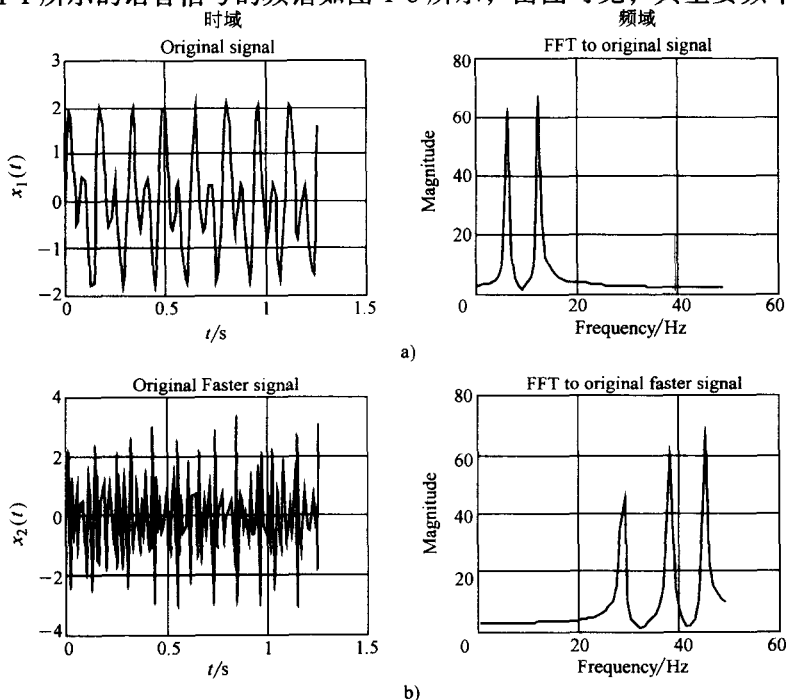


图 1-5 时间信号及其频谱

a) 慢变化信号 $x_1(t)$ 及其频谱 b) 快变化信号 $x_2(t)$ 及其频谱

以内。

数字信号处理技术在语音合成与分解、图像处理、通信等领域中有许多应用。例如，电话银行的语音合成服务：“您的余额为 \$10.58 元”，这里涉及不同频率信号的合成。数字音响设备中的高低音选择一般是采用了各种数字滤波器，对男低音采用低通滤波器，其音调对应频率在 65 ~ 330Hz，最佳提取女高音的高通滤波器的频率范围在 262 ~ 1319Hz。最适合提取女低音的带通滤波器的频率范围为 165 ~

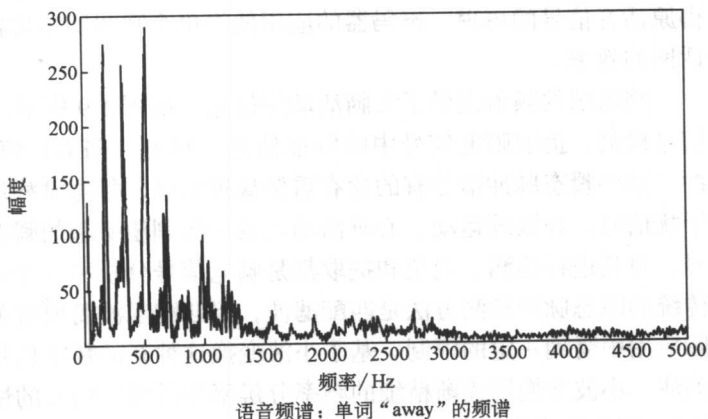


图 1-6 语音频谱：单词“away”的频谱

880Hz。对图像信号也有低通和高通滤波器等。图像的低频部分是指亮度颜色变化缓慢的部分，高频部分对应边缘或颜色突变部分。低通滤波器滤除高频成分后，图像会变得模糊，如对图 1-2 的原始图像进行低通滤波后的图像比原图模糊些，如图 1-7 所示；而对原图像进行高通滤波后可使图像的边缘锐化，以确定数字图像中物体轮廓，如图 1-8 所示。除此之外，还有图像的变形技术、合成技术等，电影中会用到变形技术，可使一幅图像平缓地变化为另一幅图像；医学中用到合成技术，同一物体的几幅数字图像可用来合成该物体的三维图像，产生比如磁共振成像（MRI）和计算机断层成像（CT）。



图 1-7 低通滤波后的图像（模糊化）



图 1-8 高通滤波后的图像（查找图像边缘）

在数字蜂窝移动电话中，DSP 主要完成两方面的任务：在保证话音可识别的基础上，以尽可能低的数码率对语音信号进行编码；在无线传输中可靠地传输数字语音信号。语音编码算法（称为声码器）对话音数据进行特征提取，构建仅需少数参数的语音模型。传输时只