



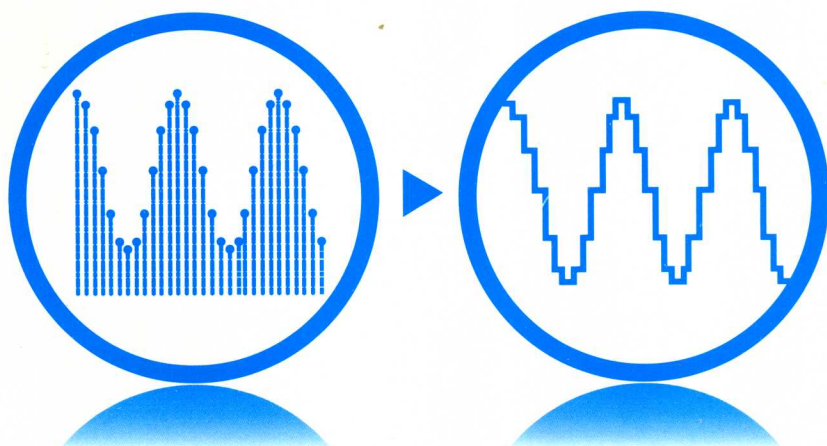
教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

信息与通信工程

Digital Signal Processing

# 数字信号处理

孙明 编著  
Sun Ming



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

Digital Signal Processing

# 数字信号处理

孙明 编著

Sun Ming



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

全书紧紧围绕谱分析和数字滤波这两个中心问题展开,系统地阐述数字信号处理的基本理论、基本算法、数字系统的设计方法和应用实例。本书讲解力求深入浅出,使读者易于掌握要点。全书共分9章,第1~5章为基础篇。其中,第1章为数字信号处理概述,介绍了数字信号处理的发展历史、主要研究内容、优缺点、应用和数字信号处理的学习方法等内容。第2~5章主要介绍了采样理论、离散时间信号与系统、 $z$ 变换以及DFT及其快速算法。第6~8章为设计篇,主要介绍数字滤波器的原理和实现。第9章为应用篇,介绍数字信号处理的一些应用实例。

本书可作为“数字信号处理”课程的教材及参考书,适用于大专院校通信工程、电子信息工程和自动控制工程等专业,对在信号处理各个领域工作的工程技术人员也有参考价值。

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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/孙明编著. —北京:清华大学出版社,2018

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-49768-4

I. ①数… II. ①孙… III. ①数字信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第037167号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:28.75

字 数:698千字

版 次:2018年8月第1版

印 次:2018年8月第1次印刷

定 价:79.00元

# 高等学校电子信息类专业系列教材

## 一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

## 一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	火箭军工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中国科学院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团股份有限公司
	蒋晓瑜	陆军装甲兵学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

# 符号说明

## 1. 运算符号

符 号	意 义
$\Sigma$	累加
$\Pi$	累乘
$*$	线性卷积, 如 $x[n] * h[n]$
$*$ (上标)	复数共轭, 如 $x^*$
$\otimes$	信号的圆周卷积, 如 $x[n] \otimes h[n]$
$T\{\}$	取变换, 如 $y[n] = T\{x[n]\}$
$\text{Re}[\cdot]$	复数的实部
$\text{Im}[\cdot]$	复数的虚部
$\text{arg}[\cdot]$	相位
$\mathcal{L}[\cdot]$	拉普拉斯变换
$\mathcal{L}^{-1}[\cdot]$	拉普拉斯反变换
$\mathcal{F}[\cdot]$	傅里叶变换
$\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$	傅里叶反变换
$\mathcal{Z}[\cdot]$	$z$ 变换
$\mathcal{Z}^{-1}[\cdot]$	$z$ 反变换
$\mathcal{DFS}\{\cdot\}$	离散傅里叶级数
$\mathcal{DTF}\{\cdot\}$	离散傅里叶变换
$\mathcal{IDTF}\{\cdot\}$	离散傅里叶反变换

## 2. 常用函数

符 号	意 义
$x[n]$	系统输入
$y[n]$	系统输出
$X[z]$	$x[n]$ 的 $z$ 变换
$\bar{x}[n]$	时域周期序列
$\tilde{X}[k]$	频域周期序列
$X[k]$	$x[n]$ 的 DFT
$\delta[n]$	单位脉冲序列(单位采样序列)
$u[n]$	单位阶跃序列
$h[n]$	单位采样响应(单位脉冲响应)
$w[n]$	窗函数
$\Delta$	量化单位
$e$	量化误差

## 3. 频率变量

符 号	意 义
$f$	实际频率,单位为 Hz
$f_s$	采样频率,单位为 Hz
$f_m$	信号最高频率,单位为 Hz
$\omega_m$	信号最高角频率,单位为弧度/秒(rad/s)
$\omega_c$	模拟截止角频率,单位为弧度/秒(rad/s)
$\Omega_m$	信号最高数字频率,单位为弧度(rad)
$\Delta\Omega$	数字频率分辨率(频率采样间隔)
$f_k$	频率刻度值
$\Delta f$	频率分辨率

# 前言

## PREFACE

“数字信号处理”是信息类专业的骨干课程,其应用非常广泛。数字信号处理估计是信息类课程中最难学习的一门课程。很多人都感觉这门课程学习起来非常吃力,原因在于大部分的《数字信号处理》书籍中大多数是满满的数学公式及推导,而对其中的物理概念缺乏清晰的介绍。因此,学生在课程学习完之后,无法将理论应用于解决实际问题。

有关数字信号处理方面的书籍可谓是浩如烟海,有些侧重理论推导,有些侧重工程应用,还有些侧重软件实现。对于侧重数学公式推导的书籍,可读性差,难以引起初学者的阅读兴趣;而对于一些弱化公式推导的教程,看似比较简单、易学,但到真正接触具体的工程问题时,则根本无从下手,或者不能举一反三。

公式推导是理工科无法避免的,数字信号处理中的公式推导是理论基础。它不同于单纯的数学公式推导,推导过程中不仅包含着其思想本质,更包含着物理概念和工程概念。针对这些情况,本书中既有严谨的公式推导过程,也有形象生动的比喻,更有丰富的工程应用实例。本书集基本理论、实现方法和工程应用于一身,偏向于工程应用,内容丰富、概念清晰、取材新颖、阐述清楚、系统性好、可读性强。既有利于读者对相关知识的掌握和理解,又可以启发读者深入思考,培养读者分析问题和解决问题的创新能力。

编写指导思想体现在以下三个方面:

(1) 以谱分析和数字滤波为主线。在内容的组织上,以基本原理、基本概念和基本方法作为分析重点;以新内容和新方法作为补充与拓展,简明介绍。

(2) 注重理论和应用的结合。为使读者能更好地应用数字信号处理的理论解决实际工程问题,本书将经典的信号处理理论寓于工程实践,对常用的典型算法均给出实际应用的分析实例,同时,还以具体的工程项目为背景,系统地分析了数字信号处理理论的工程应用方法。

(3) 突出概念与思路分析。对于重要的算法,本书给出严谨、详细的公式推导,目的是试图说明隐藏其背后的物理概念、分析方法和解决问题的思路。对于过于复杂的数学推导与计算,本书适当简化推导过程,重点阐明分析思路,应用时可直接引用结论。

本书内容详略得当、主次分明、逻辑清晰、循序渐进。采用图、表与文字等多种表现方式增进读者对内容的理解。习题的呈现方式包括了填空题、选择题、判断题和计算题等,以有利于读者观察问题、分析问题与解决问题。

本书紧紧围绕谱分析和数字滤波这两个中心问题展开论述。全书共分为9章,第1~5章为基础篇。其中,第1章为数字信号处理概述,介绍数字信号处理的发展历史、主要研究内容、优缺点、应用及数字信号处理的学习方法等内容。第2章主要介绍采样与重构理论,第3章介绍离散时间信号与系统,第4章介绍离散时间信号与系统 $z$ 变换,第5章介绍DFT

及其快速算法。第 6~8 章为设计篇,第 6 章主要介绍数字滤波器的基本概念及一些特殊滤波器,第 7 章主要介绍 FIR 数字滤波器的设计,第 8 章主要介绍 IIR 数字滤波器的设计。第 9 章为应用篇,介绍数字信号处理的一些应用实例。附录 A 中包含了数字信号处理实验,附录 B 介绍滤波器分析设计工具 FDATool,附录 C 介绍信号处理工具 SPTool。

全书由孙明编著。在本书的编写过程中参阅了许多兄弟院校的相关教材,并得到了很多同行的支持与帮助,同时还得到清华大学出版社盛东亮编辑的大力支持,作者在此对他们一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。有兴趣的朋友可发送邮件到 [sunming\\_65@163.com](mailto:sunming_65@163.com)。

编著者

2018 年 4 月



# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 数字信号处理概述</b> .....	1
1.1 数字信号处理的含义 .....	1
1.2 典型的数字信号处理系统 .....	3
1.3 数字信号处理学科的发展 .....	4
1.4 数字信号处理的主要特点 .....	6
1.5 应用领域 .....	9
1.6 数字信号处理学习 .....	10
本章小结 .....	11
习题 .....	11
<b>第 2 章 采样与重构</b> .....	12
2.1 概述 .....	12
2.2 模-数转换 .....	13
2.2.1 采样 .....	14
2.2.2 量化与编码 .....	28
2.3 数-模转换 .....	31
2.3.1 理想内插重建 .....	32
2.3.2 零阶保持内插 .....	35
2.3.3 线性内插 .....	36
本章小结 .....	38
习题 .....	38
<b>第 3 章 时域离散信号与系统</b> .....	42
3.1 时域离散信号 .....	42
3.1.1 时域离散信号的表示 .....	42
3.1.2 序列的基本运算 .....	44
3.1.3 常用序列 .....	53
3.1.4 信号的分类和特性 .....	59
3.2 时域离散系统 .....	70
3.2.1 线性系统 .....	71
3.2.2 移不变系统 .....	72
3.2.3 线性移不变系统的卷积描述 .....	73
3.2.4 因果系统 .....	76
3.2.5 稳定系统 .....	77
3.3 时域离散系统的输入输出描述法 .....	78

3.3.1	线性常系数差分方程 .....	78
3.3.2	线性常系数差分方程的求解 .....	81
	本章小结 .....	81
	习题 .....	82
<b>第 4 章</b>	<b>离散时间信号与系统的复频域分析 .....</b>	<b>85</b>
4.1	引言 .....	85
4.2	$z$ 变换及其收敛域 .....	86
4.2.1	拉氏变换到 $z$ 变换 .....	86
4.2.2	$z$ 变换的定义与收敛域 .....	88
4.3	典型序列 $z$ 变换 .....	93
4.4	$z$ 变换的性质 .....	102
4.5	$z$ 反变换 .....	113
4.6	系统函数 .....	117
4.6.1	系统函数的概念 .....	117
4.6.2	系统的因果性与稳定性 .....	119
4.6.3	系统的频率响应的几何确定法 .....	123
4.7	线性相位系统 .....	127
4.8	离散系统的框图表示 .....	131
4.8.1	基本模拟单元及方框图 .....	131
4.8.2	离散系统的结构 .....	132
4.9	离散时间系统的 $z$ 域分析 .....	140
	本章小结 .....	144
	习题 .....	144
<b>第 5 章</b>	<b>离散傅里叶变换及其快速算法 .....</b>	<b>150</b>
5.1	引言 .....	150
5.2	傅里叶变换家族——四种傅里叶变换回顾 .....	152
5.2.1	连续周期信号的傅里叶级数 .....	152
5.2.2	连续非周期信号的傅里叶变换 .....	155
5.2.3	离散非周期序列的离散时间傅里叶变换 .....	156
5.2.4	离散周期序列的离散傅里叶级数 .....	158
5.3	离散傅里叶变换 .....	161
5.3.1	离散傅里叶变换 .....	161
5.3.2	DFT 性质 .....	164
5.3.3	圆周卷积求解 .....	166
5.4	离散傅里叶变换快速算法 .....	172
5.4.1	FFT 算法 .....	172
5.4.2	基-2 时间抽取 FFT 算法 .....	177
5.4.3	基-2 频率抽取 FFT 算法 .....	187
5.5	离散傅里叶反变换的快速算法 .....	191
5.6	其他快速算法简介 .....	193
5.6.1	$N$ 为合数的 FFT 算法 .....	193
5.6.2	基-4 FFT .....	194
5.6.3	分裂基算法 .....	195

5.6.4	频谱细化分析	196
5.7	DFT 应用	198
5.7.1	用 DFT 计算线性卷积	198
5.7.2	用 FFT 计算相关函数	203
5.7.3	谱分析	205
本章小结		232
习题		232
<b>第 6 章</b>	<b>数字滤波器的基本概念及特殊滤波器</b>	<b>238</b>
6.1	数字滤波器的基本概念	238
6.1.1	数字滤波器与数字滤波	238
6.1.2	数字滤波器的实现方法	239
6.1.3	数字滤波器的分类	240
6.2	理想数字滤波器	244
6.2.1	理想数字滤波器的特点及分类	244
6.2.2	理想滤波器的可实现性	246
6.3	实际滤波器的特征参数	246
6.4	简单滤波器的设计	253
6.4.1	零点、极点累试法	254
6.4.2	一阶数字滤波器	256
6.4.3	二阶数字滤波器	259
6.4.4	低通到高通的简单变换	267
6.5	特殊滤波器	269
6.5.1	数字谐振器	269
6.5.2	梳状滤波器	272
6.5.3	正弦波发生器	276
6.5.4	数字陷波器	278
6.5.5	全通滤波器	281
6.5.6	最小相位滤波器	283
本章小结		290
习题		290
<b>第 7 章</b>	<b>FIR 数字滤波器的设计</b>	<b>296</b>
7.1	引言	296
7.2	数字滤波器的技术指标	298
7.3	FIR 滤波器设计基础	301
7.3.1	FIR 数字滤波器的线性相位特性	302
7.3.2	FIR 线性相位系统的零点分布特征	308
7.4	窗函数法	310
7.4.1	设计思想	310
7.4.2	窗函数对理想滤波器频率特性的影响	312
7.4.3	吉布斯现象	314
7.5	频率采样法	328
7.5.1	频率采样法基本概念	328
7.5.2	过渡带采样的优化设计	330

7.5.3 频率采样结构特点 .....	336
7.6 FIR 数字滤波器的优化设计 .....	337
7.6.1 问题的提出 .....	337
7.6.2 等波纹切比雪夫逼近基本思想 .....	338
7.6.3 雷米兹算法 .....	342
本章小结 .....	346
习题 .....	346
<b>第 8 章 IIR 数字滤波器的设计</b> .....	<b>352</b>
8.1 引言 .....	352
8.2 常用模拟低通滤波器简介 .....	355
8.2.1 模拟滤波器的设计指标 .....	355
8.2.2 常用模拟低通滤波器的特性 .....	357
8.3 模拟滤波器的数字化 .....	371
8.3.1 脉冲响应不变法 .....	372
8.3.2 双线性变换法 .....	378
8.4 IIR 数字滤波器的频率变换法 .....	385
8.4.1 模拟域频率变换法 .....	385
8.4.2 数字域频率变换法 .....	391
8.5 IIR 数字滤波器的优化设计法 .....	399
8.6 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较 .....	401
本章小结 .....	402
习题 .....	403
<b>第 9 章 数字信号处理方案及应用实例</b> .....	<b>409</b>
9.1 DTMF 信号的产生与检测 .....	409
9.2 语音合成 .....	414
9.3 解卷积和系统辨识 .....	417
9.4 数字波束形成 .....	419
9.5 图像增强 .....	421
本章小结 .....	424
习题 .....	424
<b>附录 A 数字信号处理实验</b> .....	<b>426</b>
实验一 基本信号的产生及其运算 .....	426
实验二 离散系统分析 .....	428
实验三 利用 FFT 对信号进行频谱分析 .....	430
实验四 用窗函数法设计 FIR 滤波器 .....	433
<b>附录 B 滤波器分析设计工具 FDATool</b> .....	<b>436</b>
<b>附录 C 信号处理工具 SPTool</b> .....	<b>442</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>446</b>

当前,“数字技术”已经渗透到各行各业,成了高新技术的代名词。信息化的基础是数字化,数字化的核心技术之一是数字信号处理。随着时代的发展,数字信号处理技术突飞猛进,应用也越来越广泛。

### 【教学目的】

- (1) 理解数字信号处理的含义,了解典型的数字信号处理系统的组成;
- (2) 了解数字信号处理学科的历史、发展及其应用领域;
- (3) 掌握数字信号处理的主要特点。

### 【教学重点与难点】

重点:

- (1) 数字信号处理任务的理解;
- (2) 深刻理解典型数字信号处理系统的组成及各模块功能。

难点:

本章内容主要为概述性的介绍和知识的回顾,无难点。

## 1.1 数字信号处理的含义

随着计算机及集成电路技术的迅速发展,自 20 世纪 60 年代起出现了一门新的学科——数字信号处理(digital signal processing, DSP)技术。它是一门涉及众多学科并广泛应用于众多领域的新兴学科。

数字信号处理包括两层含义:一是数字信号处理技术,强调的是对以数字形式表现的信号进行研究和的方法,图 1-1 所示为 DSP 算法结构;二是数字信号处理器(digital

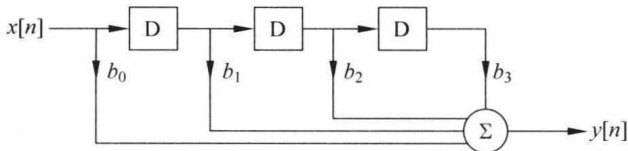


图 1-1 DSP 算法结构

signal processor), 强调的是通过专用集成电路芯片, 利用数字信号处理理论, 在芯片上运行目标程序, 实现对信号的某种处理, 图 1-2 所示为一种 DSP 处理器。

DSP 表示的是数字信号处理, 并不只代表 DSP 芯片, 实际上数字信号处理有很多不同实现方法, 可以用 DSP 芯片, 也可以用 MCU (micro controller unit), 还可以用 FPGA 和 ASIC。DSP 与微处理器的区别在于能够高速、实时地进行数字信号处理运算。

数字信号处理的目的是针对真实世界里的模拟信号进行测量和滤波, 要求在进行数字信号处理之前, 将信号从模拟状态转换成数字状态, 这时候就需要转换器。

广义的数字信号处理技术是指由数字信号处理器来完成数字信号处理算法的技术。

数字信号处理是一个新兴的技术领域, 主要研究如何应用数字或符号序列的形式来表示和处理信号, 实现信号的变换、滤波、检测与估计等功能。它将系统理论、计算机科学与大规模集成电路等方面的成就融合在一起, 应用于一些科学技术与工程领域。

因此, DSP 一方面是指数字信号理论研究, 另一方面是指用来完成数字信号处理的器件, 对于现代 DSP 而言, 还包括数字信号处理应用。

DSP 运算主要有两大任务: 信号分析和信号滤波, 如图 1-3 所示。



图 1-2 DSP 处理器

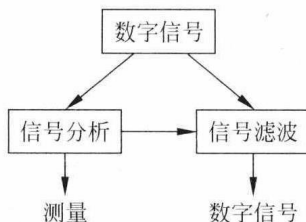


图 1-3 数字信号处理的两大任务

信号分析: 主要任务是测量信号的特性, 通常在频域中进行。常用的运算有谱分析、语音识别、语音辨识和目标检测等。

信号滤波: 该任务的特点是可以便捷地改变“信号输入-信号输出”的特性, 执行该任务的系统通常被称为滤波器。常用的滤波器可改变信号的频率特性, 让一些信号频率通过, 阻塞另一些信号频率。主要应用包括滤除不需要的背景噪声、滤除干扰和频带分离等。

数字信号处理技术采用的是数字的方法, 将离散的符号或数字进行处理的技术, 主要的工作是在剔除混杂在信号中的干扰, 减少采集信号的多余成分, 被称为数字滤波。

图 1-4 所示为模拟信号  $x(t) = 2\sin(6\pi t) + \sin(10\pi t)$  及其频谱图, 从时域图中很难看出该信号由两个不同频率的信号构成, 而从频谱图中则可明显地看到信号含有两个频率成分。

图 1-5 所示为滤除上述信号中较低频率成分后的信号及其频谱图。

因此, 整个数字信号处理过程包含了信号分析及信号滤波两个步骤。

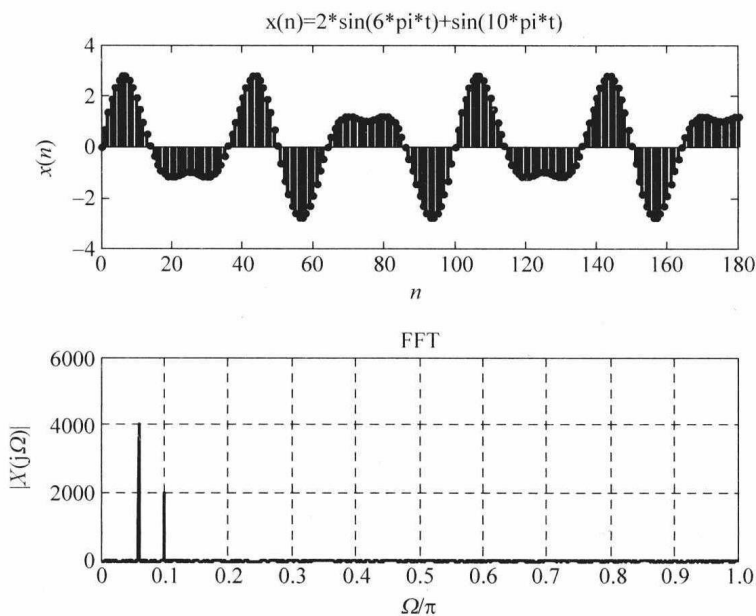


图 1-4 连续时间信号的频谱分析

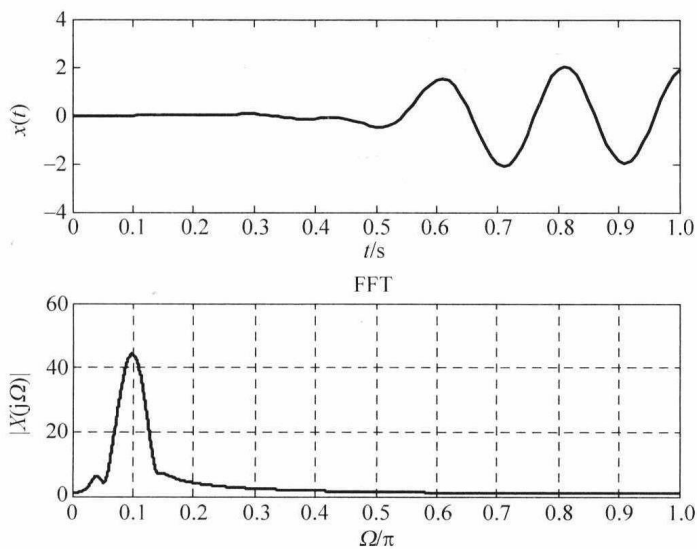


图 1-5 滤波后的信号及频谱

## 1.2 典型的数字信号处理系统

在生活中所遇到和处理的信号大多数是连续时间信号。应用计算机或数字硬件处理连续时间信号时,首先需要将所要处理的模拟信号变换为数字信号,然后再用数字技术处理。最后再将数字处理结果还原为模拟信号输出。完整的数字信号处理系统如图 1-6 所示。

图 1-6 中给出了模拟信号经数字化系统处理后,再转换成模拟信号的框图。将采集到的模拟信号经过抗混叠滤波器,经 A/D 转换后,变成数字信号。数字信号处理器对信号进

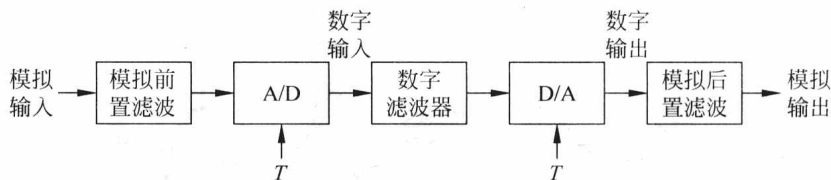


图 1-6 简化的数字信号处理系统

行处理,经 D/A 转换后经过平滑滤波输出模拟信号。

各模块功能描述如下:

(1) PrF,前置预滤波(pre-filter)或抗混叠滤波器(anti-aliasing filter),在对模拟信号进行离散化采集前,采用低通滤波器滤除高于  $1/2$  采样频率的频率成分。

(2) ADC,模拟数字转换器(analog to digital converter),是把经过与标准量(或参考量)比较处理后的模拟量转换成以二进制数值表示的离散信号的转换器。A/D 转换一般要经过采样、保持、量化及编码四个过程。转换器能够准确输出的数字信号的位数越多,表示转换器能够分辨输入信号的能力越强,转换器的性能也就越好。

(3) DSP,数字信号处理系统的核心,可以是通用计算机、专用处理器,或者数字硬件电路等。

(4) DAC,数字模拟转换器(digital to analog converter),与 ADC 运算相反,是将二进制数字量形式的离散信号转换成以标准量(或参考量)为基准的模拟量的转换器,将二进制数序列转换成阶梯波形,为产生模拟信号的第一步。

(5) PoF,后置滤波(post-filter)或平滑滤波器(smoothing filter),作用是将阶梯波形平滑后产生所需的模拟信号。

模拟音频信号经低通滤波、采样、量化及编码,最后形成数字流。图 1-7 所示为模拟音频信号数字化实现的框图。

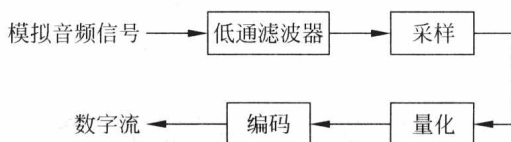


图 1-7 音频信号数字化

### 1.3 数字信号处理学科的发展

数字信号处理技术是理论性和实用性都很强的应用型技术,包括硬件技术、数字信号处理理论、软件技术以及实现途径等。

数字技术包括方法和实现两方面。方法依靠数字信号处理的理论和算法,而实现则依靠数字信号处理器所构成的硬件和软件,这两部分构成了数字信号处理这一分支学科的内容。如图 1-8 所示,数字信号处理理论的发展与应用的发展是相互推动与促进的关系,两者以 DSP 的实现为桥梁。



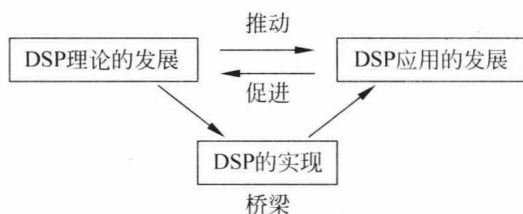


图 1-8 数字信号处理理论的发展与应用的发展之间的关系

数字信号处理是围绕着数字信号处理的理论、实现和应用等几个方面发展起来的。数字信号处理技术的发展所经过的阶段如图 1-9 所示。

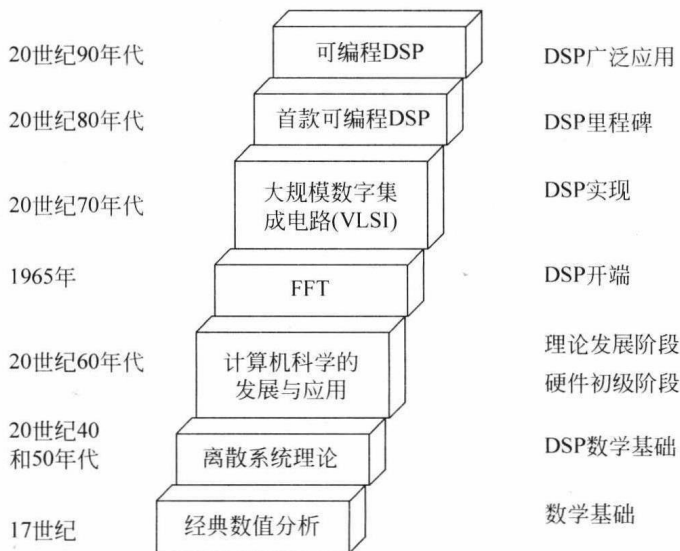


图 1-9 数字信号处理技术发展所经历的阶段

数字信号处理技术发展的主要阶段如下：

17 世纪：经典数值分析奠定数学基础。

20 世纪 40 和 50 年代：采样数据控制系统的研究进展和离散系统理论的发展奠定 DSP 数学基础。

20 世纪 60 年代：计算机科学的发展与应用使离散系统理论的理论研究与实践进入一个新阶段。

1965 年：一般认为 Cooley-Turkey 提出 FFT(快速傅里叶变换)，标志着 DSP 作为一个学科的开端，此后，“数字信号处理”这一分支学科迅速发展，逐渐形成了一整套较为完整的理论体系。

1978 年：Intel 公司推出 2920“模拟信号处理芯片”，实现模-数转换与数-模转换等 DSP 功能；Bell Labs 推出 Mac 4 DSP。

1979 年：AMI 公司推出 S2881 信号处理器。

1983 年：TI 公司推出首款可编程通用数字信号处理器 TMS32010，此后发展为 TMS320 系列，商业应用获得极大成功。

1985 年之后：众多公司如 Motorola、Phillips、ADI 和 ARM 等各自发展了多种不同的