



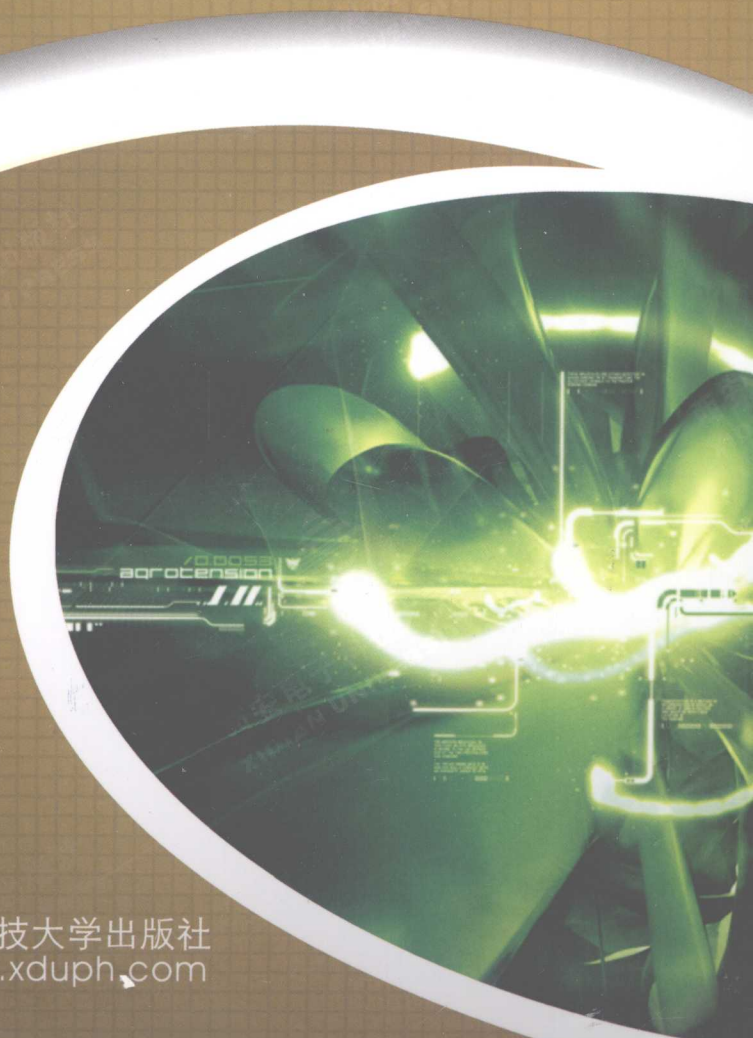
高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

# 数字信号处理

主编 徐以涛  
主审 刘顺兰



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

# 数字信号处理

主编 徐以涛

编著 程云鹏 张冬梅 童晓兵 蔡跃明

主审 刘顺兰

西安电子科技大学出版社

2009

## 内 容 简 介

本书全面、系统地阐述了数字信号处理的基本理论、算法以及实现方法。全书共 10 章, 其中第 1~4 章讲述了数字信号处理的变换域理论, 包括离散时间信号与系统的介绍、Z 变换、离散时间傅里叶变换、离散傅里叶变换、快速傅里叶变换及频率域分析等; 第 5~8 章讲述了数字信号处理的时域滤波理论, 包括 IIR 数字滤波器、FIR 数字滤波器、抽样率变换滤波器以及数字滤波器的网络结构等; 第 9~10 章讲述了数字信号处理的实现, 包括 MATLAB 实现和硬件实现等。本书内容丰富、系统性强、概念清晰。为了帮助读者深刻理解基本理论和分析方法, 书中列举了大量的精选例题, 同时还给出了各种算法的 MATLAB 仿真实验。另外, 在各章的最后还附有习题, 以帮助读者进一步巩固所学知识。

本书可作为电子工程、计算机工程、信号处理以及通信工程等专业的本科生和非电子通信类研究生教材, 也可作为相关领域的科技工作者学习数字信号处理理论的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/徐以涛主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2009. 8

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2307 - 8

I. 数… II. 徐… 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(2009)第 113860 号

策 划 毛红兵

责任编辑 孟秋黎 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 21.375

字 数 500 千字

印 数 1~4000 册

定 价 30.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2307 - 8/TN · 0529

**XDUP 2599001-1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

**西安电子科技大学出版社**  
**高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材**  
**编审专家委员会名单**

**主任:** 杨震 (南京邮电大学校长、教授)

**副主任:** 张德民 (重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、教授)

秦会斌 (杭州电子科技大学电子信息学院院长、教授)

**通信工程组**

**组长:** 张德民 (兼)

**成员:** (成员按姓氏笔画排列)

王晖 (深圳大学信息工程学院副院长、教授)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长、教授)

成际镇 (南京邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授)

刘顺兰 (杭州电子科技大学通信工程学院副院长、教授)

李白萍 (西安科技大学通信与信息工程学院副院长、教授)

张邦宁 (解放军理工大学通信工程学院卫星系系主任、教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院院长、教授)

张常年 (北方工业大学信息工程学院院长、教授)

范九伦 (西安邮电学院信息与控制系系主任、教授)

姜兴 (桂林电子科技大学信息与通信学院副院长、教授)

姚远程 (西南科技大学信息工程学院副院长、教授)

康健 (吉林大学通信工程学院副院长、教授)

葛利嘉 (中国人民解放军重庆通信学院军事信息工程系系主任、教授)

**电子信息工程组**

**组长:** 秦会斌 (兼)

**成员:** (成员按姓氏笔画排列)

王荣 (解放军理工大学通信工程学院电信工程系系主任、教授)

朱宁一 (解放军理工大学理学院基础电子学系系主任、工程师)

李国民 (西安科技大学通信与信息工程学院院长、教授)

李邓化 (北京信息工程学院信息与通信工程系系主任、教授)

吴谨 (武汉科技大学信息科学与工程学院电子系系主任、教授)

杨马英 (浙江工业大学信息工程学院副院长、教授)

杨瑞霞 (河北工业大学信息工程学院院长、教授)

张雪英 (太原理工大学信息工程学院副院长、教授)

张彤 (吉林大学电子科学与工程学院副院长、教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长、副教授)

陈鹤鸣 (南京邮电大学光电学院院长、教授)

周杰 (南京信息工程大学电子与信息工程学院副院长、教授)

欧阳征标 (深圳大学电子科学与技术学院副院长、教授)

雷加 (桂林电子科技大学电子工程学院副院长、教授)

**项目策划:** 毛红兵

**策划:** 曹 昉 寇向宏 杨 英 郭 景

# 前 言

数字信号处理是高等院校电子、信息和通信工程等各类专业的一门非常重要的专业基础课,很多高校都开设了该课程。同时,数字信号处理是一门理论和技术发展十分迅速、应用非常广泛的交叉和前沿性学科,因此,对该课程的教材和参考书也应随着科技的发展不断地从内容和讲述方法上进行改进,以适应新时期数字信号处理教学与应用的需求。

本书作者多年从事数字信号处理教学和科研工作,对教师如何讲授,读者如何学习数字信号处理的基本理论、基本概念和基本算法等方面有切身的体会。针对数字信号处理基础课教学中存在的问题,在编写过程中,作者在全书内容的取舍、章节的安排、问题的描述、例题的选用以及算法的应用与实现等方面都进行了精心安排。

本书在系统讲解数字信号处理基本原理的基础上,详细介绍了数字信号处理的软、硬件实现方法。通过对 MATLAB、DSP 和 FPGA 等实现方式的讨论,读者可进一步增强对数字信号处理基本理论和工程实践的理解。在编写中,我们把每一章所涉及的 MATLAB 函数、实现和举例按节集中放置于一章,以便于查找和学习。全书章节衔接紧密,内容循序渐进,安排合理,每章配有典型例题和习题,以方便讲授和自学。

全书内容共分 10 章,概括为两部分:第一部分包括第 1~8 章,是数字信号处理的基本原理部分;第二部分包括第 9、10 章,是数字信号处理的实现部分。原理部分第 1~4 章主要介绍数字信号处理的变换域处理方法,其中第 1 章讲述离散时间信号与系统的描述方法以及模拟信号的数字处理方法;第 2~4 章分别讨论三种重要的数学变换工具,即 Z 变换、离散时间傅里叶变换和离散傅里叶变换,以及实现离散傅里叶变换的一种快速计算方法——快速傅里叶变换等。原理部分第 5~8 章主要介绍数字信号处理的时域滤波理论及设计方法,包括 IIR 数字滤波器、FIR 数字滤波器、抽样率变换滤波器以及数字滤波器的网络结构等。在数字信号处理的实现内容中,第 9 章介绍数字信号处理的 MATLAB 实现方法,针对原理部分各种理论和算法,分别给出了具体的 MATLAB 实现;第 10 章介绍数字信号处理的硬件实现方法,重点介绍了基于 DSP 芯片和 FPGA 芯片的数字信号处理实现方法。

本书绪论、第 8、10 章由徐以涛编写,第 1 章由蔡跃明编写,第 2~4 章由程云鹏编写,第 5~7 章由张冬梅编写,第 9 章由童晓兵编写。徐以涛校阅了全书初稿,并对全书进行了统稿。本书在编写过程中得到了解放军理工大学通信工程学院领导、业务部门和无线通信系的关心和支持,我院研究生李柏文、刘鑫、武开有、刘琼俐等协助做了许多工作,在此表示感谢。

由于作者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 5 月

## 欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~“十一五”国家级规划教材~~~~~	数控机床故障分析与维修(高职)(第二版)	25.00
计算机系统结构(第四版)(李学干)	25.00	液压与气动技术(第二版)(朱梅)(高职)
计算机系统安全(第二版)(马建峰)	30.00	~~~~~计算机提高普及类~~~~~
计算机网络(第三版)(蔡皖东)	27.00	计算机应用基础(第三版)(丁爱萍)(高职)
计算机应用基础教程(第四版)(陈建铎)		22.00
(for Windows XP/Office XP)	30.00	计算机文化基础(高职)(游鑫)
计算机应用基础(冉崇善)(高职)		27.00
(Windows XP & Office 2003 版)	23.00	计算机文化基础上机实训及案例(高职)
《计算机应用基础》实践技能训练		15.00
与案例分析(高职)(冉崇善)	18.00	计算机科学与技术导论(吕辉)
微型计算机原理(第二版)(王忠民)	27.00	22.00
微型计算机原理及接口技术(第二版)(裘雪红)	36.00	计算机应用基础(高职)(赵钢)
微型计算机组成与接口技术(第二版)(高职)	28.00	29.00
微机原理与接口技术(第二版)(龚尚福)	37.00	计算机应用基础——信息处理技术教程
单片机原理及应用(第二版)(李建忠)	32.00	31.00
单片机应用技术(第二版)(高职)(刘守义)	30.00	《计算机应用基础——信息处理技术教程》
Java程序设计(第二版)(高职)(陈圣国)	26.00	习题集与上机指导(张郭军)
编译原理基础(第二版)(刘坚)	29.00	14.00
人工智能技术导论(第三版)(廉师友)	24.00	计算机组装与维修(中职)(董小莉)
多媒体软件设计技术(第三版)(陈启安)	23.00	23.00
信息系统分析与设计(第二版)(卫红春)	25.00	微型机组装与维护实训教程(高职)(杨文诚)
信息系统分析与设计(第三版)(陈圣国)(高职)	20.00	22.00
传感器原理及工程应用(第三版)	28.00	~~~~~计算机网络类~~~~~
数字图像处理(第二版)(何东健)	30.00	计算机网络技术基础教程(高职)(董武)
电路基础(第三版)(王松林)	39.00	18.00
模拟电子电路及技术基础(第二版)(孙肖子)	35.00	计算机网络管理(雷震甲)
模拟电子技术(第三版)(江晓安)	25.00	20.00
数字电子技术(第三版)(江晓安)	23.00	网络设备配置与管理(李飞)
数字电路与系统设计(第二版)(邓元庆)	35.00	23.00
数字信号处理(第三版)(高西全)	29.00	网络安全与管理实验教程(谢晓燕)
电磁场与电磁波(第二版)(郭辉萍)	28.00	35.00
现代通信原理与技术(第二版)(张辉)	39.00	网络安全技术(高职)(廖兴)
移动通信(第四版)(李建东)	30.00	19.00
移动通信(第二版)(章坚武)	24.00	网络信息安全技术(周明全)
物理光学与应用光学(第二版)(石顺祥)	42.00	17.00
		动态网页设计实用教程(蒋理)
		30.00
		ASP动态网页制作基础教程(中职)(苏玉雄)
		20.00
		局域网组建实例教程(高职)(尹建璋)
		20.00
		Windows Server 2003组网技术(高职)(陈伟达)
		30.00
		组网技术(中职)(俞海英)
		19.00
		综合布线技术(高职)(王趾成)
		18.00
		计算机网络应用基础(武新华)
		28.00
		计算机网络基础及应用(高职)(向隅)
		22.00
		~~~~~计算机技术类~~~~~
		计算机系统结构与组成(吕辉)
		26.00
		电子商务基础与实务(第二版)(高职)
		16.00
		数据结构——使用 C++语言(第二版)(朱战立)
		23.00
		数据结构(高职)(周岳山)
		15.00
		数据结构教程——Java 语言描述(朱振元)
		29.00
		离散数学(武波)
		24.00

软件工程(第二版)(邓良松)	22.00	微机装配调试与维护教程(王忠民)	25.00
软件技术基础(高职)(鲍有文)	23.00	《微机装配调试与维护教程》实训指导	22.00
软件技术基础(周大为)	30.00	~~~~~数据库及计算机语言类~~~~~	
嵌入式软件开发(高职)(张京)	23.00	C程序设计与实例教程(曾令明)	21.00
~~~~~计算机辅助技术及图形处理类~~~~~		程序设计与C语言(第二版)(马鸣远)	32.00
电子工程制图(第二版)(高职)(童幸生)	40.00	C语言程序设计课程与考试辅导(王晓丹)	25.00
电子工程制图(含习题集)(高职)(郑芙蓉)	35.00	Visual Basic.NET程序设计(高职)(马宏锋)	24.00
机械制图与计算机绘图(含习题集)(高职)	40.00	Visual C#.NET程序设计基础(高职)(曾文权)	39.00
电子线路CAD实用教程(潘永雄)(第三版)	27.00	Visual FoxPro数据库程序设计教程(康贤)	24.00
AutoCAD实用教程(高职)(丁爱萍)	24.00	数据库基础与Visual FoxPro9.0程序设计	31.00
中文版AutoCAD 2008精编基础教程(高职)	22.00	Oracle数据库实用技术(高职)(费雅洁)	26.00
电子CAD(Protel 99 SE)实训指导书(高职)	12.00	Delphi程序设计实训教程(高职)(占跃华)	24.00
计算机辅助电路设计Protel 2004(高职)	24.00	SQL Server 2000应用基础与实训教程(高职)	22.00
EDA技术及应用(第二版)(谭会生)	27.00	Visual C++基础教程(郭文平)	29.00
数字电路EDA设计(高职)(顾斌)	19.00	面向对象程序设计与VC++实践(揣锦华)	22.00
多媒体软件开发(高职)(含盘)(牟奇春)	35.00	面向对象程序设计与C++语言(第二版)	18.00
多媒体技术基础与应用(曾广雄)(高职)	20.00	面向对象程序设计——JAVA(第二版)	32.00
三维动画案例教程(含光盘)(高职)	25.00	Java程序设计教程(曾令明)	23.00
图形图像处理案例教程(含光盘)(中职)	23.00	JavaWeb程序设计基础教程(高职)(李绪成)	25.00
平面设计(高职)(李卓玲)	32.00	Access数据库应用技术(高职)(王趾成)	21.00
~~~~~操作系统类~~~~~		ASP.NET程序设计与开发(高职)(眭碧霞)	23.00
计算机操作系统(第二版)(颜彬)(高职)	19.00	XML案例教程(高职)(眭碧霞)	24.00
计算机操作系统(修订版)(汤子瀛)	24.00	JSP程序设计实用案例教程(高职)(翁健红)	22.00
计算机操作系统(第三版)(汤小丹)	30.00	Web应用开发技术: JSP(含光盘)	33.00
计算机操作系统原理——Linux实例分析	25.00	~~~~~电子、电气工程及自动化类~~~~~	
Linux网络操作系统应用教程(高职)(王和平)	25.00	电路(高贇)	26.00
Linux操作系统实用教程(高职)(梁广民)	20.00	电路分析基础(第三版)(张永瑞)	28.00
~~~~~微机与控制类~~~~~		电路基础(高职)(孔凡东)	13.00
微机接口技术及其应用(李育贤)	19.00	电子技术基础(中职)(蔡宪承)	24.00
单片机原理与应用实例教程(高职)(李珍)	15.00	模拟电子技术(高职)(郑学峰)	23.00
单片机原理与应用技术(黄惟公)	22.00	模拟电子技术(高职)(张凌云)	17.00
单片机原理与程序设计实验教程(于殿泓)	18.00	数字电子技术(高职)(江力)	22.00
单片机实验与实训指导(高职)(王曙霞)	19.00	数字电子技术(高职)(肖志锋)	13.00
单片机原理及接口技术(第二版)(余锡存)	19.00	数字电子技术(高职)(蒋卓勤)	15.00
新编单片机原理与应用(第二版)(潘永雄)	24.00	数字电子技术及应用(高职)(张双琦)	21.00
MCS-51单片机原理及嵌入式系统应用	26.00	高频电子技术(高职)(钟苏)	21.00
微机外围设备的使用与维护(高职)(王伟)	19.00	现代电子装联工艺基础(余国兴)	20.00
		微电子制造工艺技术(高职)(肖国玲)	18.00

现代控制理论基础(舒欣梅)	14.00	数控加工与编程(第二版)(高职)(詹华西)	23.00
过程控制系统及工程(杨为民)	25.00	数控加工工艺学(任同)	29.00
控制系统仿真(党宏社)	21.00	数控加工工艺(高职)(赵长旭)	24.00
模糊控制技术(席爱民)	24.00	数控加工工艺课程设计指导书(赵长旭)	12.00
工程电动力学(修订版)(王一平)(研究生)	32.00	数控加工编程与操作(高职)(刘虹)	15.00
工程力学(张光伟)	21.00	数控机床与编程(高职)(饶军)	24.00
工程力学(皮智谋)(高职)	12.00	数控机床电气控制(高职)(姚勇刚)	21.00
理论力学(张功学)	26.00	数控应用专业英语(高职)(黄海)	17.00
材料力学(张功学)	27.00	机床电器与 PLC(高职)(李伟)	14.00
材料成型工艺基础(刘建华)	25.00	电机及拖动基础(高职)(孟宪芳)	17.00
工程材料及应用(汪传生)	31.00	电机与电气控制(高职)(冉文)	23.00
工程材料与应用(戈晓岚)	19.00	电机原理与维修(高职)(解建军)	20.00
工程实践训练(周桂莲)	16.00	供电技术(高职)(杨洋)	25.00
工程实践训练基础(周桂莲)	18.00	金属切削与机床(高职)(聂建武)	22.00
工程制图(含习题集)(高职)(白福民)	33.00	模具制造技术(高职)(刘航)	24.00
工程制图(含习题集)(周明贵)	36.00	模具设计(高职)(曾霞文)	18.00
工程图学简明教程(含习题集)(尉朝闻)	28.00	冷冲压模具设计(高职)(刘庚武)	21.00
现代设计方法(李思益)	21.00	塑料成型模具设计(高职)(单小根)	37.00
液压与气压传动(刘军营)	34.00	液压传动技术(高职)(简引霞)	23.00
先进制造技术(高职)(孙燕华)	16.00	发动机构造与维修(高职)(王正键)	29.00
机械原理多媒体教学系统(资料)(书配盘)	120.00	机动车辆保险与理赔实务(高职)	23.00
机械工程科技英语(程安宁)	15.00	汽车典型电控系统结构与维修(李美娟)	31.00
机械设计基础(郑甲红)	27.00	汽车机械基础(高职)(娄万军)	29.00
机械设计基础(岳大鑫)	33.00	汽车底盘结构与维修(高职)(张红伟)	28.00
机械设计(王宁侠)	36.00	汽车车身电气设备系统及附属电气设备(高职)	23.00
机械设计基础(张京辉)(高职)	24.00	汽车单片机与车载网络技术(于万海)	20.00
机械基础(安美玲)(高职)	20.00	汽车故障诊断技术(高职)(王秀贞)	19.00
机械 CAD/CAM(葛友华)	20.00	汽车营销技术(高职)(孙华宪)	15.00
机械 CAD/CAM(欧长劲)	21.00	汽车使用性能与检测技术(高职)(郭彬)	22.00
机械 CAD/CAM 上机指导及练习教程(欧)	20.00	汽车电工电子技术(高职)(黄建华)	22.00
画法几何与机械制图(叶琳)	35.00	汽车电气设备与维修(高职)(李春明)	25.00
《画法几何与机械制图》习题集(邱龙辉)	22.00	汽车使用与技术管理(高职)(边伟)	25.00
机械制图(含习题集)(高职)(孙建东)	29.00	汽车空调(高职)(李祥峰)	16.00
机械设备制造技术(高职)(柳青松)	33.00	汽车概论(高职)(邓书涛)	20.00
机械制造基础(高职)(郑广花)	21.00	现代汽车典型电控系统结构原理与故障诊断	25.00

欢迎来函索取本社书目和教材介绍! 通信地址: 西安市太白南路2号 西安电子科技大学出版社发行部  
 邮政编码: 710071 邮购业务电话: (029)88201467 传真电话: (029)88213675。



# 目 录

绪论	1
第 1 章 离散时间信号与系统	6
1.1 信号的分类	6
1.2 离散时间信号	7
1.2.1 序列的定义	7
1.2.2 典型离散时间信号	8
1.2.3 序列的基本运算	11
1.3 离散时间系统	13
1.3.1 线性系统	13
1.3.2 时不变系统	14
1.3.3 线性时不变离散系统	14
1.3.4 线性卷积的计算	15
1.3.5 系统的因果性和稳定性	18
1.4 离散时间系统的时域描述	20
1.4.1 常系数线性差分方程的一般表达式	20
1.4.2 常系数线性差分方程的求解	21
1.5 模拟信号的离散化和重构	22
1.5.1 时域采样定理	22
1.5.2 采样信号的重构	24
1.5.3 模拟信号的数字化	25
1.5.4 数字信号的模拟化	26
习题	26
第 2 章 离散时间信号与系统的频域分析	31
2.1 Z 变换	31
2.1.1 Z 变换的定义和收敛域	31
2.1.2 收敛域与序列特性的关系	33
2.2 逆 Z 变换	36
2.2.1 留数定理法	37
2.2.2 部分分式法	39
2.2.3 幂级数法	40
2.3 Z 变换的性质与定理	42
2.3.1 Z 变换的基本性质	42
2.3.2 Z 变换求解差分方程	49
2.3.3 Z 变换与连续时间信号的拉普拉斯变换的关系	51
2.4 离散时间傅里叶变换	54
2.4.1 DTFT 的定义	54
2.4.2 DTFT 与 Z 变换的关系	56

2.4.3 DTFT与连续时间信号的傅里叶变换的关系 .....	57
2.4.4 DTFT的基本性质 .....	58
2.5 离散时间系统的频域分析 .....	64
2.5.1 系统函数与频率响应 .....	64
2.5.2 系统因果性与稳定性分析 .....	66
2.5.3 系统频率响应分析 .....	67
习题 .....	70
<b>第3章 离散傅里叶变换(DFT)</b> .....	74
3.1 周期序列的离散傅里叶级数 .....	74
3.1.1 周期序列 .....	74
3.1.2 周期序列的DFS .....	75
3.2 离散傅里叶变换 .....	77
3.2.1 DFT的定义 .....	77
3.2.2 DFT和ZT、DTFT以及DFS的关系 .....	79
3.3 离散傅里叶变换的基本性质 .....	80
3.3.1 线性特性 .....	80
3.3.2 循环移位特性 .....	80
3.3.3 循环卷积定理 .....	82
3.3.4 复共轭序列的DFT .....	84
3.3.5 帕斯维尔定理 .....	85
3.3.6 共轭对称性 .....	85
3.4 频域采样与内插 .....	89
3.4.1 频域采样定理 .....	90
3.4.2 频域内插公式 .....	91
3.5 离散傅里叶变换计算线性卷积 .....	92
3.5.1 线性卷积和循环卷积的等价条件 .....	92
3.5.2 线性卷积的DFT计算方法 .....	94
3.5.3 重叠相加法 .....	94
3.5.4 重叠保留法 .....	95
3.6 离散傅里叶变换进行谱分析 .....	97
3.6.1 连续时间信号的谱分析 .....	97
3.6.2 序列的谱分析 .....	101
3.6.3 谱分析的误差来源 .....	103
习题 .....	104
<b>第4章 快速傅里叶变换(FFT)</b> .....	107
4.1 直接计算DFT的运算量及改进途径 .....	107
4.1.1 直接计算DFT的运算量 .....	107
4.1.2 减少运算量的途径 .....	108
4.2 时间抽取法(DIT)基-2 FFT算法 .....	109
4.2.1 DIT-FFT算法原理 .....	109
4.2.2 DIT-FFT运算量分析与比较 .....	114
4.2.3 DIT-FFT运算规律 .....	115
4.2.4 DIT-FFT其它形式流程图 .....	117

4.3 频域抽取法(DIF)基-2 FFT 算法 .....	119
4.3.1 DIF-FFT 算法原理 .....	119
4.3.2 DIF-FFT 与 DIT-FFT 的比较 .....	121
4.4 快速傅里叶逆变换(IFFT)算法 .....	122
4.5 FFT 算法的工程实现考虑 .....	124
4.5.1 旋转因子的生成 .....	124
4.5.2 旋转因子的使用 .....	125
4.5.3 实序列的 FFT 计算 .....	126
习题 .....	127
<b>第 5 章 IIR 数字滤波器设计</b> .....	129
5.1 数字滤波器的基本概念 .....	129
5.1.1 滤波的概念 .....	129
5.1.2 滤波器的分类 .....	130
5.1.3 滤波器的技术指标 .....	132
5.2 模拟滤波器的设计 .....	135
5.2.1 模拟滤波器的幅度平方函数 .....	135
5.2.2 模拟滤波器经典类型 .....	136
5.2.3 模拟低通滤波器的设计 .....	140
5.2.4 高通、带通及带阻滤波器的设计 .....	145
5.3 利用模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器 .....	149
5.3.1 脉冲响应不变法 .....	150
5.3.2 双线性变换法 .....	156
5.3.3 高通、带通和带阻 IIR 数字滤波器设计 .....	160
习题 .....	162
<b>第 6 章 FIR 数字滤波器设计</b> .....	164
6.1 线性相位 FIR 滤波器 .....	164
6.1.1 线性相位的条件 .....	164
6.1.2 幅度特性 .....	166
6.1.3 零点特性 .....	169
6.2 用窗函数法设计 FIR 滤波器 .....	170
6.2.1 窗函数法基本设计思想 .....	170
6.2.2 窗函数法设计性能分析 .....	171
6.2.3 典型窗函数 .....	174
6.2.4 窗函数法设计步骤 .....	181
6.3 频率采样设计法 .....	186
6.3.1 频率采样法基本原理 .....	186
6.3.2 线性相位实现条件 .....	187
6.3.3 设计实例分析 .....	188
6.4 FIR 滤波器的最优化设计 .....	190
6.4.1 均方误差最小化优化设计 .....	190
6.4.2 等波纹逼近优化设计 .....	191
6.5 FIR 与 IIR 对比 .....	192
习题 .....	193

<b>第 7 章 数字滤波器的网络结构</b> .....	196
7.1 网络结构的信号流图表示 .....	196
7.2 IIR 数字滤波器的网络结构 .....	198
7.2.1 IIR 直接型网络结构 .....	199
7.2.2 IIR 级联型网络结构 .....	200
7.2.3 IIR 并联型网络结构 .....	201
7.3 FIR 数字滤波器的网络结构 .....	202
7.3.1 FIR 直接型网络结构 .....	203
7.3.2 FIR 级联型网络结构 .....	203
7.3.3 线性相位网络结构 .....	204
7.3.4 频率采样型网络结构 .....	206
7.4 格型网络结构 .....	209
7.4.1 全零点格型网络结构 .....	209
7.4.2 全极点格型网络结构 .....	212
7.4.3 零-极点格型网络结构 .....	214
习题 .....	215
<b>第 8 章 多抽样率数字信号处理</b> .....	219
8.1 抽样率变换的基本理论 .....	219
8.1.1 整数倍抽取 .....	219
8.1.2 整数倍插值 .....	223
8.1.3 有理数倍抽样率变换 .....	224
8.2 多抽样率系统的网络结构与实现 .....	226
8.2.1 多抽样率系统的等效变换 .....	226
8.2.2 多抽样率系统的多相结构 .....	228
8.2.3 抽样率转换的多级实现 .....	231
8.3 用于多抽样率系统的一类特殊滤波器 .....	233
8.3.1 半带滤波器 .....	233
8.3.2 积分梳状滤波器 .....	234
习题 .....	236
<b>第 9 章 数字信号处理的 MATLAB 实现</b> .....	240
9.1 MATLAB 简介 .....	240
9.1.1 MATLAB 的集成开发环境 .....	240
9.1.2 常用的 MATLAB 函数 .....	241
9.1.3 MATLAB 编程举例 .....	242
9.2 离散时间信号和系统的 MATLAB 实现 .....	244
9.2.1 典型序列的 MATLAB 实现 .....	244
9.2.2 序列运算的 MATLAB 实现 .....	247
9.2.3 线性时不变系统的 MATLAB 实现 .....	250
9.3 离散时间信号与系统的频域分析的 MATLAB 实现 .....	251
9.3.1 与频域分析相关的 MATLAB 函数 .....	251
9.3.2 离散时间信号和系统的频域分析的 MATLAB 实现 .....	253
9.4 DFT 和 FFT 的 MATLAB 实现 .....	255

9.4.1	与 DFT 和 FFT 相关的 MATLAB 函数 .....	255
9.4.2	DFT 和 FFT 的 MATLAB 实现 .....	256
9.5	IIR 滤波器的 MATLAB 实现 .....	261
9.5.1	与 IIR 滤波器相关的 MATLAB 函数 .....	261
9.5.2	IIR 滤波器设计的 MATLAB 实现 .....	263
9.6	FIR 滤波器的 MATLAB 实现 .....	266
9.6.1	与 FIR 滤波器相关的 MATLAB 函数 .....	266
9.6.2	FIR 滤波器设计的 MATLAB 实现 .....	269
9.7	数字滤波器结构的 MATLAB 实现 .....	273
9.7.1	与数字滤波器结构相关的 MATLAB 函数 .....	273
9.7.2	IIR 滤波器结构的 MATLAB 实现 .....	276
9.7.3	FIR 滤波器结构的 MATLAB 实现 .....	279
9.8	多抽样率数字信号处理的 MATLAB 实现 .....	281
9.8.1	与多抽样率数字信号处理相关的 MATLAB 函数 .....	281
9.8.2	多抽样率数字信号处理的 MATLAB 实现 .....	283
	习题 .....	284
<b>第 10 章</b>	<b>数字信号处理的硬件实现 .....</b>	<b>286</b>
10.1	基于 DSP 芯片的硬件实现 .....	287
10.1.1	DSP 芯片及其特点 .....	287
10.1.2	典型 DSP 芯片的结构及其主要性能 .....	291
10.1.3	基于 DSP 芯片系统的设计与调试 .....	296
10.2	基于 FPGA 芯片的硬件实现 .....	302
10.2.1	FPGA 芯片及其特点 .....	302
10.2.2	典型 FPGA 芯片的结构及主要性能 .....	304
10.2.3	基于 FPGA 芯片系统的设计与调试 .....	309
10.3	应用举例 .....	314
10.3.1	FIR 滤波器的 DSP 实现 .....	315
10.3.2	FIR 滤波器的 FPGA 实现 .....	318
<b>附录 A</b>	<b>数字信号处理中常用的 MATLAB 函数 .....</b>	<b>322</b>
<b>附录 B</b>	<b>缩略语 .....</b>	<b>327</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>329</b>

# 绪 论

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)是一门涉及多门学科,又应用于众多领域的重要学科。20世纪60年代以来,随着计算机和信息技术的飞速发展,有力地推动和促进了数字信号处理的发展进程。在过去的20多年时间里,数字信号处理技术已经在众多领域得到了极为广泛的应用。

数字信号处理是利用计算机或专用处理设备,以数值计算的方法对信号进行采集、变换、滤波、估值与识别等加工处理,从而得到更符合人们要求的信号或信号形式,以便将所获得的有用信息应用于实践中。与模拟信号处理相比,数字信号处理系统具有灵活、精确、抗干扰强、设备尺寸小、便于大规模集成等突出优点。下面就数字信号处理的概念、系统组成、特点及应用作一简要介绍。

## 1. 信号、系统和信号处理

### 1) 信号

信号定义为随着时间、空间或其它自变量而变化的物理量。数学上,我们把一个信号描述为一个或几个自变量的函数。例如

$$\left. \begin{aligned} s_1(t) &= 5t \\ s_2(t) &= 20t^2 \end{aligned} \right\} \quad (0.1)$$

描述了两个信号,一个随着自变量 $t$ (时间)线性变化,而另一个随着 $t$ 的二次方变化。作为另一个例子,考虑函数

$$s(x, y) = 3x + 2xy + 10y^2 \quad (0.2)$$

该函数描述了具有两个自变量 $x$ 和 $y$ 的信号,这两个自变量可以表示一个平面上的二维坐标。式(0.1)和式(0.2)描述的信号属于一类准确定义的信号,指定了信号和自变量的依赖关系。然而,有些情况下这种函数关系是未知的,或者信号过于复杂而无法用准确的公式进行描述。

自然界中有各种各样的信号,如语音、图像、心电图、脑电图等,在科学研究中,我们经常把他们表示成与时间、频率、相位等物理量相关联的函数,作为系统分析和处理的对象。

### 2) 系统

系统定义为处理(或变换)信号的物理设备。或者进一步说,凡是能将信号加以变换以达到人们要求的各种设备都称为系统。当然,系统有大小之分,一个大系统中又可细分为若干个小系统。实际上,因为系统是完成某种运算和操作的,因而我们还可把软件编程也看成是一种系统的实现方法。

按所处理的信号种类不同可将系统分为模拟系统、连续时间系统、离散时间系统和数字系统等。系统可以是线性的，也可以是非线性的；可以是时变的，也可以是时不变的。线性时不变系统是一种最为简单、常用的系统，是本书讨论的重点。

### 3) 信号处理

信号处理是研究用系统对含有信息的信号进行处理(变换)，以获得人们所希望的信号，从而达到提取信息、便于利用之目的的一门学科。信号处理的内容包括滤波、变换、检测、谱分析、估计、压缩、识别等一系列的加工处理。

因为多数工程 and 实践中遇到的是模拟信号，所以以前都是研究模拟信号处理的理论和实现，但是模拟信号处理存在灵活性不足、受环境影响大、可靠性差等缺点。随着大规模集成电路及计算机技术的飞速发展，加之 20 世纪 60 年代末以来数字信号处理理论和技术的日趋成熟和完善，用数字方法来处理信号，即数字信号处理，不断得到更加广泛的应用，并在各种应用场合发挥着越来越重要的作用。随着信息时代、数字世界的到来，数字信号处理越来越成为一门极其重要的学科和理论。

## 2. 数字信号处理系统的基本组成

自然界中大多数信号是模拟信号，也就是说，信号是连续变量的函数，这些连续变量(如时间和频率)通常在一个连续的范围内取值。这类信号可直接被合适的模拟系统处理(如滤波器、频谱分析仪或倍频器等)，以改变信号的特征或提取有用信息。在这种情况下，我们说信号是直接以模拟形式处理的，如图 0.1 所示。输入信号和输出信号均是模拟信号。

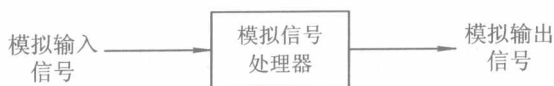


图 0.1 模拟信号处理系统方框图

数字信号处理系统的基本组成如图 0.2 所示。其中输入信号可以是语音信号、传真信号，也可以是视频信号、传感器输出信号等。输入信号经过预滤波后，通过 A/D 转换器将模拟信号转换成数字信号。数字信号处理单元是系统的核心部分，一般是用数字信号处理芯片对 A/D 转换后的数字信号按照一定的算法进行处理，然后将处理后的信号输出给 D/A 转换器，再经平滑滤波得到连续的模拟信号。

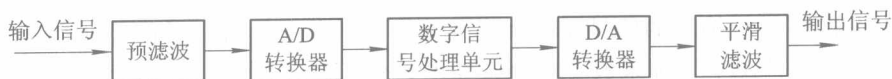


图 0.2 数字信号处理系统方框图

在该系统中，输入、输出信号均是以模拟信号的形式存在的。然而，并非所有的数字信号处理系统都具有图 0.2 所示的所有部件。例如，有些系统只需要数字输出，如频谱分析仪中输出的不是连续波形而是离散波形，可直接以数字形式显示或打印，就不需要 D/A 转换器；另一些系统的输入是数字信号，如 CD 唱机中的输入信号本身就是数字信号，因而不需要 A/D 转换器；纯数字系统则只需要数字信号处理单元这一核心部分就行了。

### 3. 数字信号处理的特点

由于数字信号处理的直接对象是数字信号，处理的方式是数值运算的方式，使它相对于模拟信号处理具有许多优点：

(1) 灵活性强。数字信号处理系统的参数预先存放在存储器中,通过改变这些存储的参数,就可以方便地改变系统的性能,甚至得到完全不同的系统。数字信号处理系统的改变可以通过在线完成,相比之下,改变模拟系统的参数要困难得多。

(2) 精度高。模拟系统的精度由元器件决定,模拟元器件的精度很难达到  $10^{-3}$  以上。目前数字信号处理系统的运算位数由 8 位提高到 16 位、32 位甚至更高,14 位字长就可达  $10^{-4}$  的精度。因此,为满足高精度的要求,高精度测量与处理系统都采用甚至只能采用数字信号处理技术。

(3) 可靠性高。模拟系统的元器件都有一定的温度系数,而且电信号是连续变化的,容易受周围环境温度及噪声等的影响。数字信号处理系统只有 0 和 1 两个信号电平,受周围环境、温度及噪声的影响较小。目前数字信号处理系统采用大规模集成电路,可靠性更高。

(4) 便于大规模集成。模拟系统采用电感器、电容器等模拟元器件,其选用非常困难,性能也难以达到要求。数字信号处理系统采用的数字器件本身具有高度规范性,便于大规模集成和生产,产品成品率高,从而降低了系统成本。

(5) 可获得高性能指标。例如,有限长脉冲响应数字滤波器可实现准确的线性相位特性,而模拟系统很难达到。再如,对信号进行频谱分析时,模拟频谱仪在频率低端只能分析到 10 Hz 以上的频率,且难以做到高分辨率,但在数字谱分析中,可作到  $10^{-3}$  Hz 的谱分析。

由于数字信号处理的突出优点,使它在通信、语音、雷达、地震测报、声纳、遥感、生物医学等行业得到愈来愈广泛的应用。

#### 4. 数字信号处理的实现

所谓数字信号处理的实现,是指将信号处理的理论应用于某一具体的任务中。随着任务的不同,数字信号处理实现的途径也不相同,总的来说,可分为软件实现和硬件实现两大类。

所谓软件实现,是指在通用的计算机上用软件来实现信号处理的一种方法。这种实现方式多是由于教学及科学研究,如产品开发前期的算法研究与仿真。软件实现方式的运算速度较慢,一般无法实时实现。

信号处理的各种软件可由使用者自己编写,也可直接调用现成的库函数。自 IEEE DSP Comm. 于 1979 年推出第一个信号处理软件包以来,国内外的研究机构、大学及有关信号处理著作的作者也推出了各自的信号处理软件包。这些都为信号处理的学习和应用提供了方便。目前,有关信号处理的最强大的软件工具是 MATLAB 语言及相应的信号处理工具箱(tool box)。该工具箱提供了数字信号处理各种理论的软件实现方法和函数集,使用者可方便地直接调用以进行研究和仿真。我们在本书第 9 章中将详细讨论数字信号处理理论的 MATLAB 实现。

所谓硬件实现,是指采用通用或专用的 DSP 芯片以及其它 IC 器件,配以适合芯片语言及任务要求的软件,来实现某种信号处理功能的一种方法。DSP 芯片较之我们所熟悉的单片机有着更为突出的优点,它结合了数字信号处理的特点,内部配有乘法器和累加器,结构上采用了流水线工作方式及多总线、并行结构,且配合有适合数字信号处理的指令,是一类可实时实现复杂数字信号处理算法的微处理器。



有关数字信号处理的各种快速算法及 DSP 器件的飞速发展使信号处理的实时实现提供了可能。所谓实时实现,是指在人的听觉、视觉允许的时间范围内,实现对输入信号的高速处理。例如,在数字移动电话、数字电视、雷达及智能化医学仪器等中的应用,信号处理都是实时进行的。信号处理的实时实现是依靠高速、高性能的数字信号处理器作支撑的,本书的第 10 章将以通用 DSP 芯片和现场可编程门阵列(FPGA)为例,详细介绍数字信号处理的硬件实现。

### 5. 数字信号处理的应用

数字信号处理系统一经问世,便吸引了很多学科的众多学者纷纷把它应用于自己的研究领域,有效推动了众多工程技术领域的技术进步和学科发展。

数字信号处理的应用主要包括:

(1) 滤波和变换:包括 FIR 滤波、IIR 滤波、自适应滤波、抽取和插值滤波、快速傅里叶变换、希尔伯特变换等。

(2) 通信:包括自适应均衡、信道编译码、信道复用、调制解调器、数字信号加密、扩频技术、分集技术、回波抵消、软件无线电等。

(3) 语音、语言:包括语音编码、语音压缩、数字录音系统、语音识别、语音合成、语音增强、文本语音变换、神经网络等。

(4) 图像、图形:包括图像压缩、图像增强、图像复原、图像重建、图像变换、图像分割与描绘、图像识别、电子地图等。

(5) 消费电子:包括数字音频、数字电视、电子玩具和游戏、CD/VCD/DVD 播放机、数字留言/应答机、汽车电子装置等。

(6) 仪器:包括频谱分析仪、函数发生器、地震信号处理器、瞬态分析仪、信道模拟器等。

(7) 工业控制与自动化:包括机器人控制、激光打印机控制、伺服控制、电力线监视器、自动驾驶控制、传感器控制等。

(8) 医疗:包括健康助理、病人监视、超声仪器、诊断工具、CT 扫描、核磁共振、助听器等。

(9) 军事:包括雷达处理、声纳处理、导航、全球定位系统(GPS)、侦察卫星、航空航天测试、自适应波束形成、阵列信号处理等。

### 6. 数字信号处理的学科发展

数字信号处理在理论上所涉及的范围极其广泛。在数学领域中的微积分、概率统计、随机过程、高等代数、数值分析、近世代数、复变函数等都是它的基本工具,网络理论、信号与系统等均是它的理论基础。在学科发展上,数字信号处理又和最优控制、通信理论、故障诊断等紧紧相连,近年来又成为人工智能、模式识别、神经网络等新兴学科的理论基础之一,其算法的实现又和计算机学科及微电子技术密不可分。因此可以说,数字信号处理是把经典的理论体系作为自己的理论基础,同时又使自己成为一系列新兴学科的理论基础。

国际上一般把 1965 年快速傅里叶变换(FFT)的问世作为数字信号处理这一学科的开始,在 40 多年的发展中,数字信号处理自身已基本形成一套较为完整的理论体系。这些