

普通高等教育“十一五”国家级规划教材辅助教材



# 《数字信号处理（第三版）》 学习指导

丁玉美 高西全 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材辅助教材

# 《数字信号处理(第三版)》 学习指导

丁玉美 高西全 编著

西安电子科技大学出版社

2009

## 内 容 简 介

《数字信号处理(第三版)》(高西全等编著)是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,这本指导书是其教学配套书。

全书共9章,分别给出了教材各章的学习要点、重要公式及若干难掌握问题的深入分析与解法,六个实验的实验原理、实验方法、实验程序和实验结果,以及各章习题与上机题的详细解答,包括所用的 MATLAB 程序。书中专列一章给出了五套自测题及其参考答案。

本书可以与《数字信号处理(第三版)》配套使用,也可以作为高等学校相关专业学生和从事数字信号处理的科技人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

《数字信号处理(第三版)》学习指导/丁玉美,高西全编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2009.3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 辅助教材

ISBN 978-7-5606-2197-5

I. 数… II. ①丁 ②高… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教学参考资料  
IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 003070 号

策 划 夏大平

责任编辑 夏大平

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3月第1版 2009年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 15.875

字 数 373千字

印 数 1~4000册

定 价 22.00元

ISBN 978-7-5606-2197-5/TN·0485

XDUP 2489001-1

\*\*\* 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。

## 前 言

《数字信号处理(第三版)》(高西全等编著)属普通高等教育“十一五”国家级规划教材,本书是与其配套应用的辅助教材。

本书共有 9 章。第 1 章是时域离散信号和时域离散系统,除了介绍教材对应章中的学习要点和重要公式外,还重点介绍线性卷积方法,并补充若干例题,给出教材对应章习题与上机题的详细解答。第 2 章是时域离散信号和系统的频域分析,除了介绍教材对应章中的学习要点和重要公式外,还重点介绍难掌握的 IFT、IZT 的计算方法,以及分析信号和系统频率特性分析方法,同样列举了若干例题,给出教材对应章习题与上机题的详细解答。第 3 章是 DFT 和 FFT,除了介绍教材第 3 章中的学习要点和重要公式以外,还重点介绍了教材第 4 章中计算循环卷积和线性卷积的快速算法,并对教材第 3、4 章的习题与上机题给出详细解答。第 4 章是时域离散系统的网络结构及数字信号处理的实现,这部分包括了教材的第 5 章和第 9 章的内容,除介绍教材对应两章的学习要点以外,重点介绍如何按照流程图写出系统的差分方程和系统函数,以及按照系统函数和差分方程设计系统的网络结构,并画出其流程图,最后列举了若干例题并对教材第 5 章的习题与上机题给出解答。第 5 章是无限脉冲响应数字滤波器的设计,重点介绍设计指标和设计方法,并列举许多例题以进一步帮助读者掌握设计方法,章末给出了教材第 6 章的习题与上机题的详细解答。第 6 章是有限脉冲响应数字滤波器的设计,重点介绍线性相位 FIR 滤波器的特点及 FIR 滤波器的设计方法,章末有教材第 7 章的习题与上机题的详细解答。第 7 章是多采样率数字信号处理,重点介绍整数因子抽取方法,章末有教材第 8 章的习题与上机题的详细解答。第 8 章是上机实验,共有六个实验,均给出实验程序、实验结果和有关波形,供读者参考。第 9 章是五份自测题,均给出了详细解答,以便本科生或大专生期末复习检查用。

本指导书在原第二版指导书的基础上作了许多改进和补充,具体表现为:

(1) 着重介绍教材各章的重点内容、重要公式,对难点进行分析,以及解题方法的介绍,滤波器部分汇总了设计方法及公式,避免了一般理论或者教材内容的简单重复。

(2) 各章的习题解答中包括求解程序及运行结果,辅导读者用 MATLAB 语言上机分析与仿真数字信号处理的基本内容。

(3) 许多章增加了例题,这对学生掌握基本理论和基本概念有很大帮助。

(4) 本书是《数字信号处理(第三版)》的配套辅导教材,但可以独立使用。各章内容和习题与上机题及其解答相对独立,因此可以作为一般学习数字信号处理的辅导教材。

(5) 本书有助于初次讲授“数字信号处理”课程的教师掌握教材内容, 扩充讲授素材, 顺利完成答疑和上机辅导等常规教学工作。

本书的出版得到了许多同志的帮助, 这里谨对他们表示感谢! 限于编著者的水平, 本辅导书中难免存在不妥之处, 欢迎读者批评指正, 我们不胜感谢。

编著者

于西安电子科技大学

2008年7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)	23.00
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)	22.00
计算机应用基础教程(第四版)(陈建锋)		计算机文化基础(高职)(游鑫)	27.00
(for Windows XP/Office XP)	30.00	计算机文化基础上机实训及案例(高职)	15.00
计算机应用基础(冉崇善)(高职)		计算机科学与技术导论(吕辉)	22.00
(Windows XP & Office 2003 版)	23.00	计算机应用基础(高职)(赵钢)	29.00
《计算机应用基础》实践技能训练		计算机应用基础——信息处理技术教程	31.00
与案例分析(高职)(冉崇善)	18.00	《计算机应用基础——信息处理技术教程》	
微型计算机原理(第二版)(王忠民)	27.00	习题集与上机指导(张郭军)	14.00
微型计算机原理及接口技术(第二版)(裘雪红)	36.00	计算机组装与维修(中职)(董小莉)	23.00
微型计算机组成与接口技术(第二版)(高职)	28.00	微型机组装与维护实训教程(高职)(杨文诚)	22.00
微机原理与接口技术(第二版)(龚尚福)	37.00	~~~~~计算机网络类~~~~~	
单片机原理及应用(第二版)(李建忠)	32.00	计算机网络技术基础教程(高职)(董武)	18.00
单片机应用技术(第二版)(高职)(刘守义)	30.00	计算机网络管理(雷震甲)	20.00
Java程序设计(第二版)(高职)(陈圣国)	26.00	网络设备配置与管理(李飞)	23.00
编译原理基础(第二版)(刘坚)	29.00	网络安全与管理实验教程(谢晓燕)	35.00
人工智能技术导论(第三版)(廉师友)	24.00	网络安全技术(高职)(廖兴)	19.00
多媒体软件设计技术(第三版)(陈启安)	23.00	网络信息安全技术(周明全)	17.00
信息系统分析与设计(第二版)(卫红春)	25.00	动态网页设计实用教程(蒋理)	30.00
信息系统分析与设计(第三版)(陈圣国)(高职)	20.00	ASP动态网页制作基础教程(中职)(苏玉雄)	20.00
传感器原理及工程应用(第三版)	28.00	局域网组建实例教程(高职)(尹建璋)	20.00
数字图像处理(第二版)(何东健)	30.00	Windows Server 2003组网技术(高职)(陈伟达)	30.00
电路基础(第三版)(王松林)	39.00	组网技术(中职)(俞海英)	19.00
模拟电子电路及技术基础(第二版)(孙肖子)	35.00	综合布线技术(高职)(王趾成)	18.00
模拟电子技术(第三版)(江晓安)	25.00	计算机网络应用基础(武新华)	28.00
数字电子技术(第三版)(江晓安)	23.00	计算机网络基础及应用(高职)(向隅)	22.00
数字电路与系统设计(第二版)(邓元庆)	35.00	~~~~~计算机技术类~~~~~	
数字信号处理(第三版)(高西全)	29.00	计算机系统结构与组成(吕辉)	26.00
电磁场与电磁波(第二版)(郭辉萍)	28.00	电子商务基础与实务(第二版)(高职)	16.00
现代通信原理与技术(第二版)(张辉)	39.00	数据结构——使用 C++语言(第二版)(朱战立)	23.00
移动通信(第四版)(李建东)	30.00	数据结构(高职)(周岳山)	15.00
移动通信(第二版)(章坚武)	24.00	数据结构教程——Java 语言描述(朱振元)	29.00
物理光学与应用光学(第二版)(石顺祥)	42.00	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	供配电技术(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

<b>第 1 章 时域离散信号和时域离散系统</b> .....	1
1.1 学习要点与重要公式 .....	1
1.1.1 学习要点 .....	1
1.1.2 重要公式 .....	1
1.2 解线性卷积的方法 .....	2
1.3 例题 .....	4
1.4 习题与上机题解答 .....	7
<b>第 2 章 时域离散信号和系统的频域分析</b> .....	24
2.1 学习要点与重要公式 .....	24
2.1.1 学习要点 .....	24
2.1.2 重要公式 .....	25
2.2 FT 和 ZT 的逆变换 .....	26
2.3 分析信号和系统的频率特性 .....	26
2.4 例题 .....	27
2.5 习题与上机题解答 .....	30
<b>第 3 章 离散傅里叶变换(DFT)及其快速算法(FFT)</b> .....	56
3.1 学习要点与重要公式 .....	56
3.1.1 学习要点 .....	56
3.1.2 重要公式 .....	56
3.2 频率域采样 .....	58
3.3 循环卷积和线性卷积的快速计算以及信号的频谱分析 .....	58
3.3.1 循环卷积的快速计算 .....	58
3.3.2 线性卷积的快速计算——快速卷积法 .....	59
3.3.3 用 DFT/FFT 进行频谱分析 .....	59
3.4 例题 .....	59
3.5 教材第 3 章习题与上机题解答 .....	66
3.6 教材第 4 章习题与上机题解答 .....	86
<b>第 4 章 时域离散系统的网络结构及数字信号处理的实现</b> .....	91
4.1 教材第 5 章学习要点 .....	91
4.2 按照系统流程图求系统函数或者差分方程 .....	91
4.3 按照系统函数或者差分方程画系统流程图 .....	92
4.3.1 FIR 中的线性相位结构 .....	92

4.3.2	FIR 中的频率采样结构 .....	93
4.3.3	IIR 中的级联结构和并联结构 .....	93
4.4	例题 .....	94
4.5	教材第 9 章学习要点 .....	98
4.6	教材第 5 章习题与上机题解答 .....	98
<b>第 5 章</b>	<b>无限脉冲响应(IIR)数字滤波器的设计</b> .....	<b>115</b>
5.1	学习要点 .....	115
5.1.1	IIR 数字滤波器设计的基本概念及基本设计方法 .....	115
5.1.2	模拟滤波器的设计 .....	118
5.1.3	从 AF 入手设计 DF .....	120
5.1.4	IIR-DF 的直接设计法 .....	120
5.2	例题 .....	121
5.3	教材第 6 章习题与上机题解答 .....	127
<b>第 6 章</b>	<b>有限脉冲响应(FIR)数字滤波器的设计</b> .....	<b>147</b>
6.1	学习要点 .....	147
6.1.1	线性相位概念与具有线性相位的 FIR 数字滤波器的特点 .....	147
6.1.2	FIR 数字滤波器设计方法 .....	148
6.2	教材第 7 章习题与上机题解答 .....	149
<b>第 7 章</b>	<b>多采样率数字信号处理</b> .....	<b>173</b>
7.1	引言 .....	173
7.2	学习要点及重要公式 .....	173
7.2.1	整数因子 $D$ 抽取 .....	173
7.2.2	整数因子 $I$ 内插器 .....	174
7.2.3	有理数因子 $I/D$ 采样率转换系统 .....	176
7.3	采样率转换系统的高效实现 .....	177
7.4	教材第 8 章习题与上机题解答 .....	178
<b>第 8 章</b>	<b>上机实验</b> .....	<b>186</b>
8.1	实验一：系统响应及系统稳定性 .....	186
8.1.1	实验指导 .....	186
8.1.2	实验参考程序 .....	188
8.1.3	实验结果与波形 .....	189
8.1.4	分析与讨论 .....	190
8.2	实验二：时域采样与频域采样 .....	191
8.2.1	实验指导 .....	191
8.2.2	实验程序清单 .....	194
8.2.3	实验程序运行结果 .....	195
8.2.4	简答思考题 .....	196
8.3	实验三：用 FFT 对信号作频谱分析 .....	196

8.3.1	实验指导 .....	196
8.3.2	实验程序清单 .....	198
8.3.3	实验程序运行结果 .....	200
8.3.4	分析与讨论 .....	200
8.4	实验四: IIR 数字滤波器设计及软件实现 .....	203
8.4.1	实验指导 .....	203
8.4.2	滤波器参数及实验程序清单 .....	206
8.4.3	实验程序运行结果 .....	207
8.4.4	简答思考题 .....	208
8.5	实验五: FIR 数字滤波器设计与软件实现 .....	209
8.5.1	实验指导 .....	209
8.5.2	滤波器参数及实验程序清单 .....	211
8.5.3	实验程序运行结果 .....	212
8.5.4	简答思考题 .....	213
8.6	实验六: 数字信号处理在双音多频拨号系统中的应用 .....	213
8.6.1	实验目的 .....	213
8.6.2	实验原理和方法 .....	214
8.6.3	实验内容 .....	218
8.6.4	实验报告 .....	218
8.6.5	实验程序清单及运行结果 .....	218
<b>第 9 章</b>	<b>自测题 .....</b>	<b>220</b>
9.1	自测题(一) .....	220
9.2	自测题(二) .....	222
9.3	自测题(三) .....	223
9.4	自测题(四) .....	225
9.5	自测题(五) .....	226
9.6	自测题(一)参考答案 .....	227
9.7	自测题(二)参考答案 .....	230
9.8	自测题(三)参考答案 .....	232
9.9	自测题(四) 参考答案 .....	235
9.10	自测题(五)参考答案 .....	238
<b>附录</b>	<b>特殊绘图函数 .....</b>	<b>242</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>244</b>

## 第1章 时域离散信号和时域离散系统

本章内容与教材第1章内容相对应。

### 1.1 学习要点与重要公式

本章内容是全书的基础。学生从学习模拟信号分析与处理到学习数字信号处理,要建立许多新的概念。数字信号和数字系统与原来的模拟信号和模拟系统不同,尤其是处理方法上有本质的区别。模拟系统用许多模拟器件实现,数字系统则通过运算方法实现。如果读者对本章关于时域离散信号与系统的若干基本概念不清楚,则学到数字滤波器时,会感到“数字信号处理”这门课不好掌握,总觉得学习的不踏实。因此学好本章是极其重要的。

#### 1.1.1 学习要点

(1) 信号: 模拟信号、时域离散信号、数字信号三者之间的区别; 常用的时域离散信号; 如何判断信号是周期性的, 其周期如何计算等。

(2) 系统: 什么是系统的线性、时不变性以及因果性、稳定性; 线性、时不变系统输入和输出之间的关系; 求解线性卷积的图解法(列表法)、解析法, 以及用 MATLAB 工具箱函数求解; 线性常系数差分方程的递推解法。

(3) 模拟信号的采样与恢复: 采样定理; 采样前的模拟信号和采样后得到的采样信号之间的频谱关系; 如何由采样信号恢复成原来的模拟信号; 实际中如何将时域离散信号恢复成模拟信号。

#### 1.1.2 重要公式

$$(1) \quad y(n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)h(n-m) = x(n) * h(n)$$

这是一个线性卷积公式, 注意公式中是在  $-\infty \sim \infty$  之间对  $m$  求和。如果公式中  $x(n)$  和  $h(n)$  分别是系统的输入和单位脉冲响应,  $y(n)$  是系统输出, 则该式说明系统的输入、输出和单位脉冲响应之间服从线性卷积关系。

$$(2) \quad x(n-n_0] = x(n) * \delta(n-n_0]$$

该式说明任何序列与  $\delta(n)$  的线性卷积等于原序列。

$$(3) \quad x(n-n_0] = x(n) * \delta(n-n_0]$$

$$(3) \quad \hat{X}_a(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_a(j\Omega - jk\Omega_s)$$

这是关于采样定理的重要公式,根据该公式要求对信号的采样频率要大于等于该信号的最高频率的两倍以上,才能得到不失真的采样信号。

$$x_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT) \frac{\sin[\pi(t-nT)/T]}{\pi(t-nT)/T}$$

这是由时域离散信号理想恢复模拟信号的插值公式。

## 1.2 解线性卷积的方法

解线性卷积是数字信号处理中的重要运算。解线性卷积有三种方法,即图解法(列表法)、解析法和在计算机上用 MATLAB 语言求解。它们各有特点。图解法(列表法)适合于简单情况,短序列的线性卷积,因此考试中常用,不容易得到封闭解。解析法适合于用公式表示序列的线性卷积,得到的是封闭解,考试中会出现简单情况的解析法求解。解析法求解过程中,关键问题是确定求和限,求和限可以借助于画图确定。第三种方法适合于用计算机求解一些复杂的较难的线性卷积,实验中常用。

解线性卷积也可用 Z 变换法,以及离散傅里叶变换求解,这是后面几章的内容。下面通过例题说明。

设  $x(n]=R_4(n)$ ,  $h(n)=R_4(n)$ , 求  $y(n)=x(n) * h(n)$ 。

该题是两个短序列的线性卷积,可以用图解法(列表法)或者解析法求解。表 1.2.1 给出了图解法(列表法),用公式可表示为

表 1.2.1 图解法(列表法)

$x(m)$				1	1	1	1			
$h(m)$				1	1	1	1			
$h(-m)$	1	1	1	1						$y(0)=1$
$h(1-m)$		1	1	1	1					$y(1)=2$
$h(2-m)$			1	1	1	1				$y(2)=3$
$h(3-m)$				1	1	1	1			$y(3)=4$
$h(4-m)$					1	1	1	1		$y(4)=3$
$h(5-m)$						1	1	1	1	$y(5)=2$
$h(6-m)$							1	1	1	$y(6)=1$

$$y(n) = \{\dots, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 3, 2, 1, 0, 0, \dots\}$$

下面用解析法求解,写出卷积公式为

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)h(n-m) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_4(m)R_4(n-m)$$

在该例题中,  $R_4(m)$  的非零区间为  $0 \leq m \leq 3$ ,  $R_4(n-m)$  的非零区间为  $0 \leq n-m \leq 3$ , 或写成  $n-3 \leq m \leq n$ , 这样  $y(n)$  的非零区间要求  $m$  同时满足下面两个不等式:

$$\begin{aligned} 0 &\leq m \leq 3 \\ m-3 &\leq m \leq n \end{aligned}$$

由上面公式表明  $m$  的取值和  $n$  的取值有关, 需要将  $n$  作分段的假设。按照上式, 当  $n$  变化时,  $m$  应该按下式取值:

$$\max\{0, n-3\} \leq m \leq \min\{3, n\}$$

当  $0 \leq n \leq 3$  时, 下限应该是 0, 上限应该是  $n$ ; 当  $4 \leq n \leq 6$  时, 下限应该是  $n-3$ , 上限应该是 3; 当  $n < 0$  或  $n > 6$  时, 上面的不等式不成立, 因此  $y(n) = 0$ ; 这样将  $n$  分成三种情况计算:

(1)  $n < 0$  或  $n > 6$  时,

$$y(n) = 0$$

(2)  $0 \leq n \leq 3$  时,

$$y(n) = \sum_{m=0}^n 1 = n + 1$$

(3)  $4 \leq n \leq 6$  时,

$$y(n) = \sum_{m=n-3}^3 1 = 7 - n$$

将  $y(n)$  写成一个表达式, 如下式:

$$y(n) = \begin{cases} n+1 & 0 \leq n \leq 3 \\ 7-n & 4 \leq n \leq 6 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

在封闭式求解过程中, 有时候决定求和的上下限有些麻烦, 可借助于非零值区间的示意图确定求和限。在该例题中, 非零值区间的示意图如图 1.2.1 所示。在图 1.2.1(b) 中, 当  $n < 0$  时, 图形向左移动, 图形不可能和图 1.2.1(a) 的图形有重叠部分, 因此  $y(n) = 0$ 。当图形向右移动时,  $0 \leq n \leq 3$ , 图形如图 1.2.1(c) 所示, 对照图 1.2.1(a), 重叠部分的上下限自然是  $0 \leq m \leq n$ 。当图形再向右移动时,  $4 \leq n \leq 6$ , 如图 1.2.1(d) 所示, 重叠部分的上下限是  $n-3 \leq m \leq 3$ 。当图形再向右移动时,  $7 \leq n$ , 图形不可能和图 1.2.1(a) 有重叠部分, 因此  $y(n) = 0$ 。

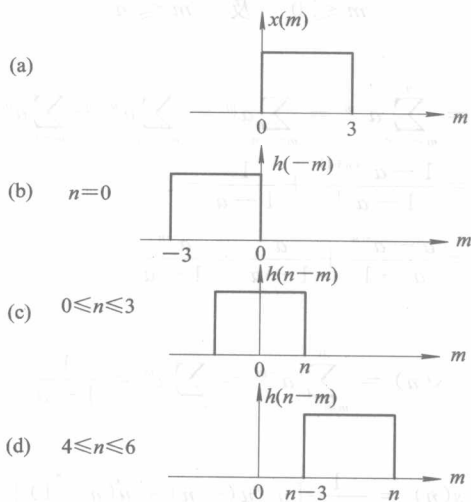


图 1.2.1 卷积信号的非零值区间示意图 [1.2.1 例]

该例题说明,解析法中定求和限有些麻烦,但借助图示容易解决。短序列的线性卷积用列表法简单,尽量不用解析法。

### 1.3 例题

**[例 1.3.1]** 线性时不变系统的单位脉冲响应  $h(n)$  表示,输入  $x(n]$  是以  $N$  为周期的周期序列,试证明输出  $y(n)$  亦是以  $N$  为周期的周期序列。

证明:

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)x(n-m) \quad (1)$$

因为输入  $x(n)$  是以  $N$  为周期的周期序列,因此

$$x(n+kN-m) = x(n-m)$$

将上式代入(1)式,得到

$$y(n) = h(n) * x(n+kN) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)x(n+kN-m) = y(n+kN)$$

上式说明  $y(n)$  也是以  $N$  为周期的周期序列。

**[例 1.3.2]** 线性时不变系统的单位脉冲响应  $h(n)$  为

$$h(n) = a^{-n}u(-n)$$

计算该系统的单位阶跃响应。

解:用  $s(n)$  表示系统的单位阶跃响应,则

$$\begin{aligned} s(n) &= h(n) * x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)u(n-m) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} a^{-m}u(-m)u(n-m) \end{aligned}$$

按照上式,  $s(n)$  的非零区间可由下面两个不等式确定:

$$m \leq 0 \quad \text{及} \quad m \leq n$$

(1)  $n \leq 0$  时,

$$\begin{aligned} s(n) &= \sum_{m=-\infty}^n a^{-m} = \sum_{m=-n}^{\infty} a^m = \sum_{m=-n}^0 a^m + \sum_{m=0}^{\infty} a^m - 1 \\ &= \frac{1-a^{-(n+1)}}{1-a^{-1}} + \frac{1}{1-a} - 1 \\ &= \frac{a-a^{-n}}{a-1} + \frac{a}{1-a} = \frac{a^{-n}}{1-a} \end{aligned}$$

(2)  $n > 0$  时,

$$s(n) = \sum_{m=-\infty}^0 a^{-m} = \sum_{m=0}^{\infty} a^m = \frac{1}{1-a}$$

最后得到

$$s(n) = \frac{1}{1-a} [a^{-n}u(-n) + u(n-1)]$$

**[例 1.3.3]** 设时域离散线性时不变系统的单位脉冲响应  $h(n)$  和输入激励信号  $x(n)$

分别为

$$h(n) = \left(\frac{j}{2}\right)^n u(n) \quad j = \sqrt{-1}$$

$$x(n) = \cos(\pi n)u(n)$$

求系统的稳态响应  $y(n)$ 。

解:  $x(n) = \cos(\pi n)u(n) = (-1)^n u(n)$

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)x(n-m) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(\frac{j}{2}\right)^m u(m)(-1)^{n-m} u(n-m) \\ &= \sum_{m=0}^n \left(\frac{j}{2}\right)^m (-1)^{n-m} = (-1)^n \sum_{m=0}^n \left(-\frac{j}{2}\right)^m \\ &= (-1)^n \frac{1 - \left(-\frac{j}{2}\right)^{n+1}}{1 + \frac{j}{2}} \end{aligned}$$

当  $n \rightarrow \infty$  时, 稳态解为

$$y(n) = (-1)^n \left(\frac{4}{5} - j\frac{2}{5}\right)$$

[例 1.3.4] 假设 5 项滑动平均滤波器的差分方程为

$$y(n) = \frac{1}{5}[x(n) + x(n-1) + x(n-2) + x(n-3) + x(n-4)]$$

输入信号用图 1.3.1 表示, 画出该滤波器输出的前 16 个序列值的波形, 并说明该滤波器对输入信号起什么作用。

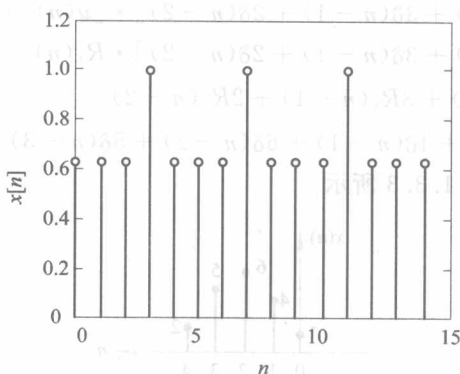


图 1.3.1

解: 已知系统的差分方程和输入信号求系统输出, 可以用递推法求解, 这里采用 MATLAB 函数 filter 计算。

调用 MATLAB 函数 filter 计算该系统的系统响应的程序 exp134.m 如下:

```
%程序 exp134.m
```

```
%调用 conv 实现 5 项滑动平均滤波
```



```

xn=0.5 * ones(1, 15); xn(4)=1; xn(6)=1; xn(10)=1;
hn=ones(1, 5);
yn=conv(hn, xn);
%以下为绘图部分
n=0; length(yn)-1;
subplot(2, 1, 1); stem(n, yn, '.');
xlabel('n'); ylabel('y(n)')

```

程序运行结果如图 1.3.2 所示。由图形可以看出, 5 项滑动平均滤波器对输入波形起平滑滤波作用, 将信号的第 4、8、12、16 的序列值平滑去掉。

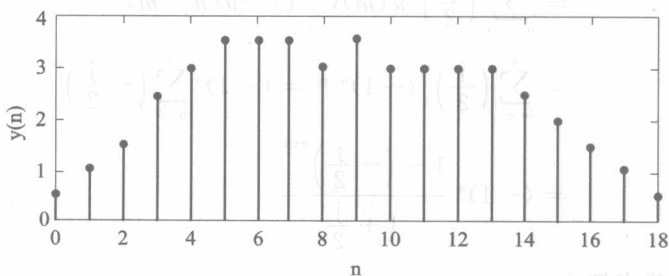


图 1.3.2

**[例 1.3.5]** 已知  $x_1(n) = \delta(n) + 3\delta(n-1) + 2\delta(n-2)$ ,  $x_2(n) = u(n) - u(n-3)$ , 试求信号  $x(n)$ , 它满足  $x(n) = x_1(n) * x_2(n)$ , 并画出  $x(n)$  的波形。(选自西安交通大学 2003 年攻读硕士学位研究生入学考试试题)

**解:** 这是一个简单的计算线性卷积的题目。

$$\begin{aligned}
 x(n) &= x_1(n) * x_2(n) \\
 &= [\delta(n) + 3\delta(n-1) + 2\delta(n-2)] * [u(n) - u(n-3)] \\
 &= [\delta(n) + 3\delta(n-1) + 2\delta(n-2)] * R_3(n) \\
 &= R_3(n) + 3R_3(n-1) + 2R_3(n-2) \\
 &= \delta(n) + 4\delta(n-1) + 6\delta(n-2) + 5\delta(n-3) + 2\delta(n-4)
 \end{aligned}$$

画出  $x(n)$  的波形如图 1.3.3 所示。

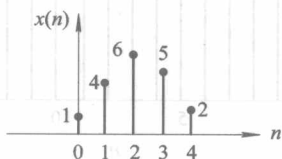


图 1.3.3

**[例 1.3.6]** 已知离散信号  $x(n]$  如图 1.3.4(a) 所示, 试求  $y(n) = x(2n) * x(n)$ , 并画出  $y(n)$  的波形。(选自西安交通大学 2001 年攻读硕士学位研究生入学考试试题)

**解:** 这也是一个计算线性卷积的题目, 只不过要先求出  $x(2n)$ 。解该题适合用列表法(图解法)。

$$x(2n) = \{1, 1, 1, 0.5\}$$