



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

本书主教材为“十三五”江苏省高等学校重点教材
第1版获评为江苏省精品教材

信息与通信工程

Study Guide for Digital Signal Processing
Principles and Practice (Third Edition)

数字信号处理原理及实现 学习指导 (第3版)

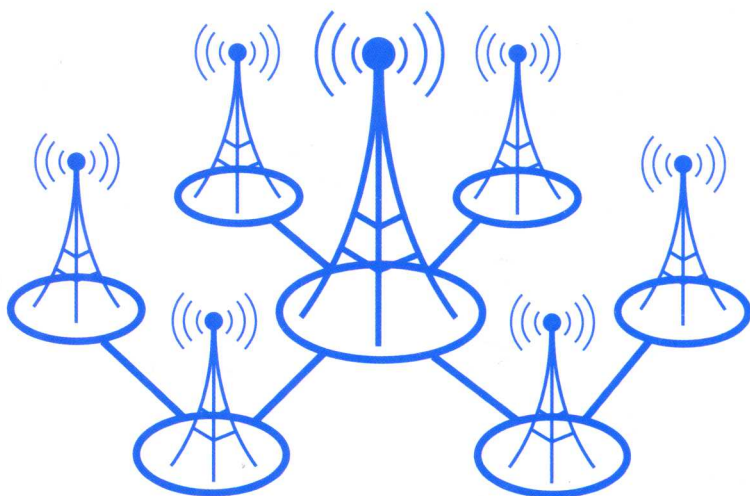
王艳芬 王刚 张晓光 刘卫东 编著

Wang Yanfen

Wang Gang

Zhang Xiaoguang

Liu Weidong



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

Study Guide for Digital Signal Processing
Principles and Practice (Third Edition)

数字信号处理原理及实现 学习指导

(第3版)

王艳芬 王刚 张晓光 刘卫东 编著

Wang Yanfen

Wang Gang

Zhang Xiaoguang

Liu Weidong



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是主教材《数字信号处理原理及实现》(第3版)(王艳芬等编著)的配套辅助教材,可以独立使用,共包括10章内容。第1章~第9章内容与主教材相一致。每一章都包括六部分:第一部分是重点与难点;第二部分是知识结构;第三部分是内容提要,对课程内容进行系统的阐述和归纳总结;第四部分是典型例题分析;第五部分是习题解答,对教材中的所有习题进行较详尽的解答;第六部分是自测题及参考答案。第10章是综合测试及解答,给出了几套本科生课程考试和研究生入学考试模拟试题与解答,并选编了部分院校的研究生入学考试真题及解答,可全面测试读者对教材知识的掌握。

本书重点突出,概念清楚,内容充实,题型多样,理论和实际结合紧密。本书主要作为信息与通信工程专业高年级本科生复习之用,并为准备考研的学生提供考前指导和帮助,也可供从事信息处理、通信、电子技术等专业的工程技术人员及有关科研、教学人员参考使用。

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

数字信号处理原理及实现学习指导/王艳芬等编著. —3版. —北京:清华大学出版社,2019
(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-51908-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 288198 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:时翠兰

责任印制:李红英

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

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 装 者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18.25

字 数:437千字

版 次:2008年2月第1版 2019年9月第3版

印 次:2019年9月第1次印刷

定 价:59.00元

产品编号:068623-01

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	国防科技大学 (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	国防科技大学	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		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学、合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(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)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程的教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

第3版前言

PREFACE

《数字信号处理原理及实现学习指导》(第2版)自2014年8月由清华大学出版社出版以来,至今已有四年。本书是第3版,可与主教材(《数字信号处理原理及实现》(第3版)已经在2017年8月由清华大学出版社出版)配套使用,也可以独立使用。和第2版相比,本书有以下改进:

- (1) 对第3版主教材每一章扩充的内容(如习题)都相应进行了补充和解答;
- (2) 在第4章内容提要中增加了“4.3.4 实序列的FFT算法”;
- (3) 第5章5.3节根据主教材内容的变化进行了梳理和完善;
- (4) 第10章在10.1节中对试题一作较大修改和补充,在10.2节中,更新和扩充了部分近几年的研究生考试题,并调整了部分题的分数;
- (5) 对每一章后的自测题进行了扩充,都增加了10道判断题和答案;
- (6) 改正了第2版中出现的错误。

本书是主教材《数字信号处理原理及实现》(第3版)(王艳芬等编著)一书的配套辅助教材,共包括10章内容。前9章内容与主教材相一致。每一章都包括六部分:第一部分是重点与难点;第二部分是知识结构;第三部分是内容提要,对课程内容进行系统的阐述和归纳总结;第四部分是典型例题分析;第五部分是习题解答,对教材中的所有习题进行较详尽的解答;第六部分是自测题及参考答案。第10章是综合测试及参考答案,给出了几套本科生课程考试和研究生入学考试模拟试题与解答,选编了部分院校的研究生入学考试真题并给出解答,可全面测试读者对教材知识点的掌握。

本书中插图分两类编号,其中的习题插图编号同习题序号,其他插图按顺序编号,特此说明。

本书仍然主要作为工科信息通信类本科高年级学生复习之用,并为准备考研的学生提供考前指导和帮助。同时也可对讲授数字信号处理课程的教师扩充讲授素材、顺利完成答疑和上机辅导等起到较好的指导作用。

本书由王艳芬教授担任主编。第1~4章和第8章由王艳芬教授编写,第5、9章由王刚副教授编写,第6章由张晓光副教授编写,第7章由刘卫东副教授编写,第10章由王艳芬和王刚共同编写。

限于编者水平,加上时间紧张,书中难免存在不妥之处,诚挚希望广大读者批评指正。

编者

2019年5月

第2版前言

PREFACE

《数字信号处理原理及实现学习指导》教材自2009年3月由清华大学出版社出版以来,至今已有五年。主教材《数字信号处理原理及实现》(第2版)已经在2013年10月由清华大学出版社出版。本书是《数字信号处理原理及实现学习指导》的第2版,可与第2版主教材配套使用,也可以独立使用。和第1版相比,本版有以下改进:

(1) 对第2版主教材每一章扩充的内容(包括习题和新增的第8章内容)都做了相应的优化、补充和解答。

(2) 因为新增了第8章,所以将原来的第9章改为第10章,扩充了部分综合测试题及解答,并增加“部分高校硕士研究生入学考试试题选编及解答”一节,选编了南京邮电大学、北京交通大学、中国矿业大学等院校的近几年的考研试题,并进行了解答。此外,对原来的4套本科生试卷(10.1节)也进行了部分调整,其中对试题二进行了全面调整。

(3) 每一章都增加“知识结构”一节。

(4) 改正了第1版的错误。

本书是主教材《数字信号处理原理及实现》(第2版)(王艳芬等编著)一书的配套辅助教材,也可以独立使用,共包括10章内容。第1章~第9章内容与主教材相一致。每一章都包括六部分:第一部分是重点与难点;第二部分是知识结构;第三部分是内容提要,对课程内容进行了系统的阐述和归纳总结;第四部分是典型例题分析;第五部分是习题解答,对教材中的所有习题都进行了较详尽的解答;第六部分是自测题及参考答案。第10章是综合测试及参考答案,给出了几套本科生课程考试和研究生入学考试模拟试题与解答,并选编了部分院校的研究生入学考试真题及解答,可全面测试读者对教材知识点的掌握。

本书仍然主要作为信息与通信工程类高年级本科生复习之用,并为准备考研的学生提供考前指导和帮助。同时也对讲授数字信号处理课程的教师扩充讲授素材、顺利完成答疑和上机辅导等具有较好的作用。

本书由王艳芬教授担任主编。第1章~第4章和第8章由王艳芬教授编写,第5章、第9章由王刚副教授编写,第6章由张晓光副教授编写,第7章由刘卫东副教授编写,第10章由王艳芬和王刚共同编写。

限于编者水平,加上时间紧张,书中难免有疏漏,诚挚希望广大读者批评指正。

编者

2014年3月

第1版前言

PREFACE

随着信息技术的飞速发展,数字信号处理理论和技术日益成熟,已成为一门重要的学科,并在各个领域得到广泛应用。“数字信号处理”基础知识已成为信息工程、电子科学与技术、电气自动化以及其他电类专业必须掌握的专业基础知识和必修内容。

本书是主教材《数字信号处理原理及实现》(王艳芬等编著,清华大学出版社出版)一书的配套辅助教材,也可以独立使用,共包括9章内容。第9章是新增加的本科生课程考试和研究生入学考试试题及解答,前8章内容与主教材相一致,即离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的频域分析、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、IIR数字滤波器设计、FIR数字滤波器设计、数字滤波器结构及MATLAB上机实验等。每一章都包括五部分:第一部分是重点与难点,主要列出了该章主教材内容的重要概念和难点内容;第二部分是内容提要,对课程中的基本内容进行了系统的阐述和归纳总结;第三部分是典型例题分析,将本章中的重点或难点内容通过例题分析给出较好的解题思路 and 技巧;第四部分是习题解答,对教材中的所有习题都进行了较详尽的解答,有不少题给出了多种解法;第五部分是自测题及参考答案,使读者通过自测题检查和了解掌握基本概念的情况。最后一章是综合测试,给出了几套本科生考试试题及解答,可全面测试读者对教材知识点的掌握。

本书作为主教材的配套用书,对主教材每一章所涉及的基本概念和基本原理都进行了归纳和总结,并给出了每一章的典型例题分析和所有习题详解包括第8章的MATLAB上机习题部分解答和提示,第9章汇集了几年来本科生课程考试和研究生入学考试试题及解答,综合性强。本书的特点是:重点突出,概念清楚,内容充实,题型多样,理论和实际结合紧密。

本书主要作为工科信息通信类本科高年级学生复习之用,并为准备考研的学生提供考前指导和帮助。同时也对讲授数字信号处理课程的教师扩充讲授素材、顺利完成答疑和上机辅导等起到较好的作用。

本书由王艳芬教授担任主编。第1章~第4章由王艳芬教授编写,第5章、第8章由王刚副教授编写,第6章由张晓光副教授编写,第7章由刘卫东副教授编写,第9章由王艳芬和王刚共同编写。

限于编者水平,加上时间紧张,书中难免有疏漏,诚挚希望广大读者批评指正。

编者

2008年9月

图书资源支持

感谢您一直以来对清华版图书的支持和爱护。为了配合本书的使用,本书提供配套的资源,有需求的读者请扫描下方的“清华电子”微信公众号二维码,在图书专区下载,也可以拨打电话或发送电子邮件咨询。

如果您在使用本书的过程中遇到了什么问题,或者有相关图书出版计划,也请您发邮件告诉我们,以便我们更好地为您服务。

我们的联系方式:

地址:北京市海淀区双清路学研大厦 A 座 701

邮编: 100084

电话: 010-62770175-4608

资源下载: <http://www.tup.com.cn>

客服邮箱: tupjsj@vip.163.com

QQ: 2301891038 (请写明您的单位和姓名)

教学交流、课程交流



清华电子



扫一扫,获取最新目录

用微信扫一扫右边的二维码,即可关注清华大学出版社公众号“清华电子”。

目录

CONTENTS

序	III
第3版前言	V
第2版前言	VII
第1版前言	IX
第1章 离散时间信号与系统的时域分析	1
1.1 重点与难点	1
1.2 知识结构	1
1.3 内容提要	2
1.3.1 离散时间信号	2
1.3.2 离散时间系统	4
1.3.3 离散时间系统的时域描述——差分方程	5
1.3.4 模拟信号数字处理方法	5
1.4 典型例题分析	8
1.5 习题解答	11
1.6 自测题及参考答案	28
第2章 离散时间信号与系统的频域分析	30
2.1 重点与难点	30
2.2 知识结构	30
2.3 内容提要	31
2.3.1 序列的傅里叶变换	31
2.3.2 序列的Z变换	32
2.3.3 系统函数与频率响应	35
2.4 典型例题分析	37
2.5 习题解答	38
2.6 自测题及参考答案	56
第3章 离散傅里叶变换	58
3.1 重点与难点	58
3.2 知识结构	58
3.3 内容提要	59

3.3.1	傅里叶变换的几种形式	59
3.3.2	离散傅里叶级数(DFS)	60
3.3.3	离散傅里叶变换	60
3.3.4	频域采样理论	63
3.3.5	用 DFT 计算线性卷积	65
3.3.6	用 DFT 进行频谱分析	66
3.4	典型例题分析	67
3.5	习题解答	69
3.6	自测题及参考答案	84
第 4 章	快速傅里叶变换	87
4.1	重点与难点	87
4.2	知识结构	87
4.3	内容提要	88
4.3.1	直接计算 DFT 的问题及改进的途径	88
4.3.2	DIT 基 2-FFT 算法与 DIF 基 2-FFT 算法	88
4.3.3	IDFT 的高效算法	90
4.3.4	实序列的 FFT 算法	90
4.3.5	线性调频 Z 变换(CZT)	91
4.4	典型例题分析	92
4.5	习题解答	93
4.6	自测题及参考答案	102
第 5 章	IIR 数字滤波器的设计	104
5.1	重点与难点	104
5.2	知识结构	104
5.3	内容提要	105
5.3.1	数字滤波器的基本概念	105
5.3.2	模拟滤波器的设计	108
5.3.3	用脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器	109
5.3.4	用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器	110
5.3.5	IIR 数字滤波器的频率变换	111
5.3.6	IIR 数字滤波器的直接设计法	112
5.3.7	IIR 数字滤波器的相位均衡	113
5.4	典型例题分析	113
5.5	习题解答	115
5.6	自测题及参考答案	127
第 6 章	FIR 数字滤波器的设计	130
6.1	重点与难点	130
6.2	知识结构	130
6.3	内容提要	131

6.3.1	线性相位 FIR 滤波器的条件和特点	131
6.3.2	窗函数法设计 FIR 滤波器	133
6.3.3	频率采样法设计 FIR 滤波器	134
6.3.4	等波纹逼近法设计 FIR 滤波器	136
6.3.5	简单整系数法设计 FIR 滤波器	136
6.3.6	FIR 与 IIR 数字滤波器的比较	137
6.4	典型例题分析	138
6.5	习题解答	141
6.6	自测题及参考答案	154
第 7 章	数字滤波器结构与有限字长效应	156
7.1	重点与难点	156
7.2	知识结构	156
7.3	内容提要	157
7.3.1	基本结构单元	157
7.3.2	无限长脉冲响应(IIR)滤波器的基本网络结构	157
7.3.3	有限长脉冲响应(FIR)滤波器的基本网络结构	160
7.3.4	数字滤波器的格型结构	163
7.3.5	有限字长效应	164
7.4	典型例题分析	167
7.5	习题解答	171
7.6	自测题及参考答案	187
第 8 章	多采样率数字信号处理	190
8.1	重点与难点	190
8.2	知识结构	190
8.3	内容提要	190
8.3.1	序列的整数倍抽取与插值	190
8.3.2	有理倍数的采样率转换	192
8.3.3	多采样率转换滤波器的设计	193
8.4	典型例题分析	194
8.5	习题解答	195
8.6	自测题及参考答案	207
第 9 章	数字信号处理实验	209
9.1	部分上机习题提示与解答	209
9.2	设计性例题分析	217
9.3	课程设计习题	221
第 10 章	综合测试及参考答案	224
10.1	本科生数字信号处理期末考试试题汇编及解答	224
	试题一	224
	试题一解答	227

试题二	230
试题二解答	233
试题三	235
试题三解答	237
试题四	239
试题四解答	242
10.2 部分高校硕士研究生入学考试试题选编及解答	245
南京邮电大学(2008—2015)硕士研究生入学考试试题选编	245
试题解答	248
北京交通大学(2008—2015)硕士研究生入学考试试题选编	252
试题解答	254
中国矿业大学(2011—2017)硕士研究生入学考试试题选编	258
试题解答	260
10.3 硕士研究生入学考试模拟试题及解答	265
试题一(数字信号处理部分)	265
试题一解答	266
试题二(数字信号处理部分)	267
试题二解答	268
试题三(数字信号处理部分)	270
试题三解答	271
参考文献	273

离散时间信号与系统的 时域分析

1.1 重点与难点

本章是数字信号处理的基础内容,主要介绍离散时间信号和系统的基本概念、基本分析方法。

本章重点: 典型离散时间信号的表示方法; 线性时不变系统的因果性和稳定性, 系统的输入、输出描述法, 线性常系数差分方程的解法; 模拟信号数字处理方法。

本章难点: 线性常系数差分方程的解法; 模拟信号数字处理方法。

1.2 知识结构

本章包括离散时间信号、离散时间系统和模拟信号数字处理方法等三部分,其知识结构图如图 1-1 所示。

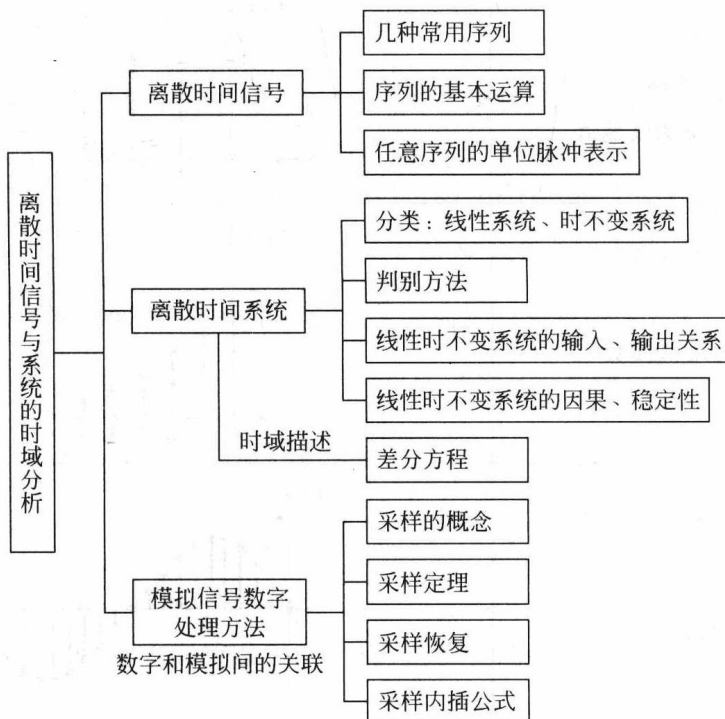


图 1-1 第 1 章的知识结构图

1.3 内容提要

1.3.1 离散时间信号

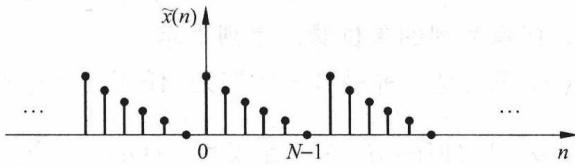
1. 常用的基本序列

在信号分析中,常用的基本序列有单位脉冲序列、单位阶跃序列、矩形序列、实指数序列、正弦型序列、复指数序列和周期序列等。其定义及波形如表 1-1 所示。前几种序列比较简单,对于正弦型序列,需要注意以下几点:

表 1-1 常用的基本序列定义及波形

序号	序 列	波 形
1	单位脉冲序列 $\delta(n) = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$	
2	单位阶跃序列 $u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}$	
3	矩形序列 $R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & n \text{ 为其他值} \end{cases}$	
4	实指数序列 $x(n) = a^n u(n), a \text{ 为实数}$	
5	正弦型序列 $x(n) = \sin(\omega n)$ 或 $x(n) = \cos(\omega n)$	

续表

序号	序列	波形
6	复指数序列 $x(n) = e^{(\sigma + j\omega)n}$	若 $\sigma = 0$, 可得 $x(n) = e^{j\omega n} = \cos(\omega n) + j\sin(\omega n)$
7	周期序列 $\tilde{x}(n) = x(n + N), -\infty < n < \infty$	例如: 

1) 数字频率与模拟频率

将正弦型序列 $x(n) = \cos(\omega n)$ 看成是对连续正弦信号 $x(t) = \cos(\Omega t)$ 的等间隔采样 ($t = nT$), 其中, 数字频率 ω 与模拟角频率 Ω 的关系是 $\omega = \Omega T = \frac{\Omega}{f_s} = 2\pi \frac{f}{f_s}$, 数字域频率是模拟域频率对采样频率的归一化值, 即数字频率只有相对意义, 不能表示频率的绝对大小。

数字频率 ω 的含义与模拟信号的概念是不同的。模拟正弦中的角频率 Ω 的单位是 rad/s, 而此处 ω 的单位仅是 rad(无量纲)。这是因为 n 是无量纲整数, ω 表示相邻两个样点弧度的变化量。

2) 数字低频与数字高频

当 $\omega = 0$ 时, $\cos(\omega n)$ 变化最慢(不变化); 当 $\omega = \pi$ 时, $\cos(\omega n)$ 变化最快。所以在序列分析和数字滤波器描述中, 在主值区上, 将 $\omega = 0$ 附近称为数字低频, 而将 $\omega = \pi$ 附近称为数字高频。容易证明, 当满足采样定理时 $f_s \geq 2f_c$, 模拟信号的最高频率 f_c 对应的数字频率 $\omega_c = 2\pi f_c / f_s \leq \pi$, 当取采样频率 $f_s = 2f_c$ 时, $\omega_c = 2\pi f_c / f_s = \pi$ 。

3) 周期序列

模拟周期信号的采样不一定是周期序列, 只有当采样频率与信号周期构成一定关系时才能得到周期序列。例如, 要使一个正弦序列 $A\sin(\omega n + \varphi)$ 是周期序列, 必须满足以下条件:

$$A\sin(\omega n + \varphi) = A\sin(\omega(n + N) + \varphi) = A\sin(\omega n + \omega N + \varphi)$$

要满足 $x(n + N) = x(n)$, 则要求 $N = \frac{2\pi}{\omega}k$, 式中 k 与 N 均取整数, 且 k 的取值要保证 N 是最小的正整数, 满足这些条件, 正弦序列才是以 N 为周期的周期序列。

例如, $x(n) = \sin\left(\frac{\pi}{5}n\right)$ 。 $\omega = \frac{\pi}{5}$, $N = \frac{2\pi}{\omega}k = 10$, 其中 $k = 1$, 所以 $x(n)$ 是周期为 10 的周期序列。若 $x(n) = \sin\left(\frac{1}{5}n\right)$, 则 $N = \frac{2\pi}{\omega}k = 10\pi k$, 为无理数, 所以 $x(n)$ 不是周期序列。

要点: 正弦序列或复指数序列不一定是周期序列, 只有当数字频率 ω 是 π 的函数, 即 $\omega = \alpha\pi$ (α 为有理数), 才一定是周期序列。

2. 序列的基本运算

(1) 乘法和加法: 序列之间的乘法和加法, 是指它的同序号的序列值逐项对应相乘和相加。

(2) 移位: 设某一序列 $x(n)$, m 为正整数, 则 $x(n - m)$ 表示序列右移(延时); $x(n + m)$