



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材  
电子信息学科基础课程系列教材

# 数字信号处理

姚天任 编著

清华大学出版社





普通高等教育“十一五”国家级规划教材



教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材  
电子信息学科基础课程系列教材

# 数字信号处理

姚天任 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍数字信号处理的基本理论、重要概念和设计方法。第1章,综述数字信号处理学科的内容、发展概况和应用领域;第2章,介绍离散时间信号和离散时间系统的基本理论;第3章,讨论离散傅里叶变换的理论及其快速算法;第4章,介绍 FIR 和 IIR 滤波器的各种结构和有限字长效应;第5章,介绍 FIR 和 IIR 数字滤波器的设计方法,以及微分器和 Hilbert 变换器的设计方法;第6章,讨论多速率数字信号处理。

本书着重基本概念、基础理论和基本方法的阐述,突出重点,分散难点,并配有丰富的例题和习题,适于作为教材,也便于自学。

本书适合作为高等学校信息与通信工程、自动化、计算机、电子科学与技术、测控技术与仪表、生物医学工程、雷达、声呐等理工科专业的本科生教材,也可作为从事这些专业的科学研究和工程技术工作的人员的参考书。

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/姚天任编著. —北京:清华大学出版社,2011.3

(电子信息学科基础课程系列教材)

ISBN 978-7-302-23918-5

I. ①数… II. ①姚… III. ①数字信号—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(2010)第 191873 号

责任编辑:文 怡

责任校对:梁 毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, [jsjic@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:jsjic@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:38.75 字 数:963 千字

版 次:2011 年 3 月第 1 版 印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:57.00 元

---

产品编号:022659-01

# 《电子信息学科基础课程系列教材》 编 审 委 员 会

## 主任委员

王志功(东南大学)

## 委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)

王小海(浙江大学)

王 萍(天津大学)

刘宗行(重庆大学)

刘新元(北京大学)

张晓林(北京航空航天大学)

陈后金(北京交通大学)

郭宝龙(西安电子科技大学)

高上凯(清华大学)

徐淑华(青岛大学)

崔 翔(华北电力大学)

董在望(清华大学)

蒋宗礼(北京工业大学)

邓建国(西安交通大学)

王诗宓(清华大学)

王福昌(华中科技大学)

刘润华(中国石油大学)

张 石(东北大学)

沈连丰(东南大学)

郑宝玉(南京邮电大学)

柯亨玉(武汉大学)

高小榕(清华大学)

袁建生(清华大学)

傅丰林(西安电子科技大学)

曾孝平(重庆大学)

## 《电子信息学科基础课程系列教材》 丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004~2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程研究组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和研究,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

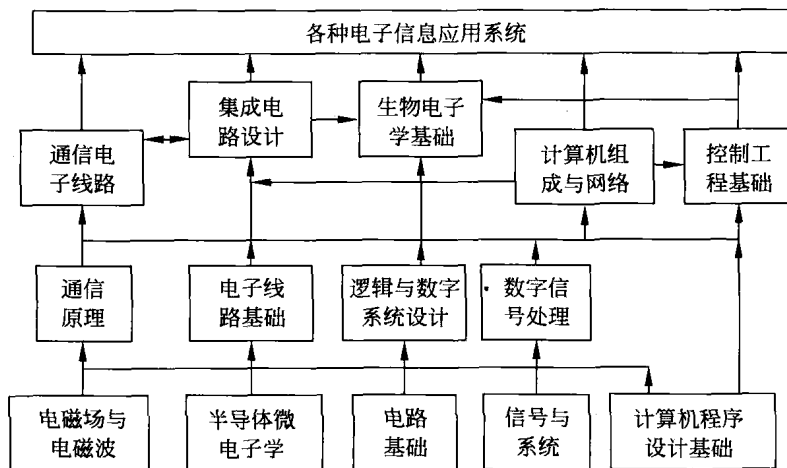
在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

- (1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。
- (2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。
- (3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。

(4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 信息工程
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

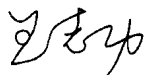
我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容

和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008年1月

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,适合作为信息与通信工程、自动化、计算机、电子科学与技术、测控技术与仪表、生物医学工程、雷达、声呐等理工科专业的本科生教材,也适合作为从事这些专业的科学研究和工程技术工作的人员的参考书。学习本书之前,读者需具有信号与线性系统的基础知识。

信息科学是研究信息的获取、传输、处理和应用的科学。数字化、网络化和智能化是信息技术发展的方向,其中数字化是网络化和智能化的基础。因此,数字信号处理成为信息科学中内容异常丰富、发展非常迅速和应用十分广泛的一门学科。作为本科生的一门重要专业基础课,数字信号处理课程应当把数字信号处理学科的基础理论、基本概念和基本方法作为重点内容。这些内容主要包括离散时间信号和离散时间系统的时域和频域分析方法,离散傅里叶变换及其快速算法,以及数字滤波器等理论,这些正是本书的主要内容。学习完本书后,读者就有条件进一步学习有关的研究生课程。

数字计算机和信号处理在众多领域的广泛应用,促使数字信号处理学科产生出许多分支学科。如果把这些分支学科看成是由数字信号处理的某些“根”衍生出来的,那么,这些“根”应该包括:多速率信号处理和滤波器组、自适应滤波器、时频分析、非线性信号处理。这四方面内容的理论基础则是被称为经典数字信号处理两大支柱的离散傅里叶变换(discrete Fourier transformation, DFT)及其快速算法(fast Fourier transformation, FFT)和数字滤波器,本书正是以这两方面的核心内容为基础展开的。这两方面的核心内容的理论基础,是离散时间信号和离散时间系统的基本理论。考虑到与“信号与线性系统”课程内容的衔接,本书没有重复其中有关连续时间信号和系统的理论,只是重点复习并深化解了离散时间信号和系统理论中的某些重要概念,例如,数字频率、序列的抽取和内插、循环卷积、频谱混叠、离散时间系统的因果性和稳定性等概念。此外,本书特别强调了正弦序列和复指数序列的离散时间傅里叶变换在理论和实际应用中的重要作用。

关于离散傅里叶变换及其快速算法,本书重点阐述了 DFT 的物理意义、DFT 的幅度、时间轴和频率轴、几种傅里叶分析方法之间的联系等重要概念;特别对矩形序列的 DFT 进行了详细分析;对加窗截断在 DFT 中引起的频谱泄漏现象和序列补零对 DFT 的影响等问题,从理论与实际的结合上进行了深入分析。DFT 不仅是重要的理论成果,而且已经成为线性滤波、谱分析、相关分析等应用领域的重要工具。DFT 之所以重要,不仅由于它能够成功地对离散时间信号和系统进行频域描述和分析,而且还由于它具有许多行之有效的快速计算方法,其中应用最为广泛的一类方法就是 FFT。本书对 FFT 的



常用算法及其 MATLAB 实现方法进行了详细介绍。此外,还对 FFT 在计算线性卷积和实现分段卷积等应用中需要考虑的实际问题,例如,输入数据的采集和处理、算法程序的编写、处理增益,以及 FFT 计算结果的解读等实际问题进行了讨论。

关于数字滤波器,本书用了第 4 和第 5 两章篇幅进行讨论。第 4 章分两大部分,第一部分对 FIR 和 IIR 滤波器的各种结构进行全面介绍;第二部分详细讨论滤波器实现中的有限字长效应。第 5 章,全面介绍 FIR 和 IIR 数字滤波器的各种实用设计方法,也对微分器和 Hilbert 变换器的设计进行了介绍。所有设计方法的 MATLAB 实现是本章的重点之一。第 6 章,讨论多速率数字信号处理和滤波器组。除了对取样频率转换的理论和方法、取样频率变换的多相滤波器实现和多速率信号处理的典型应用等进行介绍外,还对正交镜像滤波器组的理论和设计方法进行了介绍。有关滤波器组的理论和方法涉及比较广泛的内容,其中许多属于研究生课程的内容,因此,本章只局限于介绍均匀滤波器组的基本理论。

本书的主要特点是强调基本概念、基础理论和基本方法,注意突出重点和分散难点,注意理论与实际的结合。因此,本书通过大量例题和习题介绍了如何利用 MATLAB 解决实际应用问题。

限于作者水平,书中疏漏和不足之处在所难免,希望读者不吝赐教。

作 者

2010 年 12 月

于华中科技大学

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 概论</b>              | <b>1</b>  |
| 1.1 离散时间信号和数字信号              | 2         |
| 1.2 数字信号处理                   | 3         |
| 1.3 数字信号处理的优点和局限             | 6         |
| 1.4 数字信号处理学科的内容、发展和应用        | 8         |
| 1.4.1 数字信号处理学科的内容            | 9         |
| 1.4.2 数字信号处理学科发展概况           | 9         |
| 1.4.3 数字信号处理的应用              | 12        |
| 1.5 本书内容简介                   | 14        |
| <b>第 2 章 离散时间信号和离散时间系统</b>   | <b>17</b> |
| 2.1 离散时间信号——序列               | 18        |
| 2.1.1 基型序列                   | 18        |
| 2.1.2 模拟频率和数字频率              | 21        |
| 2.1.3 周期序列                   | 28        |
| 2.1.4 序列的基本运算                | 31        |
| 2.2 离散时间系统                   | 43        |
| 2.2.1 系统的线性、时不变性、因果性和稳定性     | 43        |
| 2.2.2 线性时不变系统                | 47        |
| 2.3 离散时间傅里叶变换                | 56        |
| 2.3.1 离散时间傅里叶变换的定义           | 56        |
| 2.3.2 DTFT 的性质               | 59        |
| 2.3.3 离散时间信号的频谱              | 61        |
| 2.3.4 离散时间系统的频率响应            | 62        |
| 2.4 $z$ 变换                   | 66        |
| 2.4.1 $z$ 变换的定义和收敛域          | 67        |
| 2.4.2 逆 $z$ 变换               | 71        |
| 2.4.3 $z$ 变换的性质和常用的 $z$ 变换公式 | 78        |
| 2.5 传输函数                     | 80        |
| 2.5.1 LTI 系统的传输函数            | 80        |

# 目录

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 2.5.2 | 利用传输函数分析系统的频率响应 .....      | 81  |
| 2.5.3 | 利用传输函数分析系统的稳定性 .....       | 84  |
| 2.5.4 | 利用传输函数计算 LTI 系统的输出 .....   | 87  |
| 2.6   | 离散时间信号和系统的 MATLAB 分析 ..... | 90  |
| 2.6.1 | 离散时间信号的产生 .....            | 90  |
| 2.6.2 | 序列的基本运算 .....              | 93  |
| 2.6.3 | 线性卷积和相关序列的计算 .....         | 95  |
| 2.6.4 | DTFT 的计算 .....             | 97  |
| 2.6.5 | 系统频率响应的计算 .....            | 99  |
| 2.6.6 | 系统的有理传输函数的计算 .....         | 102 |
| 2.6.7 | 离散时间系统的输出的计算 .....         | 108 |
| 习题    | .....                      | 111 |
| 第 3 章 | 离散傅里叶变换及其快速算法 .....        | 115 |
| 3.1   | DFT 的基本概念 .....            | 116 |
| 3.1.1 | DFT 的定义 .....              | 116 |
| 3.1.2 | 由 DFT 重构序列 .....           | 119 |
| 3.1.3 | 由 DFT 重构 DTFT .....        | 121 |
| 3.1.4 | DFT 的物理意义 .....            | 125 |
| 3.1.5 | DFT 的幅度、时间轴和频率轴 .....      | 128 |
| 3.1.6 | 4 种傅里叶分析方法 .....           | 131 |
| 3.2   | DFT 的性质 .....              | 133 |
| 3.3   | 矩形序列的 DFT .....            | 146 |
| 3.4   | 利用 DFT 进行信号频谱分析 .....      | 153 |
| 3.4.1 | 加窗截断造成频谱泄漏和分辨率降低 .....     | 153 |
| 3.4.2 | 序列加窗对 DFT 的影响 .....        | 160 |
| 3.4.3 | 序列补零对 DFT 的影响 .....        | 166 |
| 3.5   | 利用 DFT 计算线性卷积 .....        | 172 |
| 3.5.1 | 基本原理 .....                 | 172 |
| 3.5.2 | 用 DFT 实现分段卷积 .....         | 175 |
| 3.6   | DFT 的快速计算方法：快速傅里叶变换 .....  | 178 |
| 3.6.1 | 时间抽取基-2 FFT 算法的信号流程图 ..... | 179 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 3.6.2 | 时间抽取基-2 FFT 算法结构的特点 .....         | 181 |
| 3.6.3 | 时间抽取基-2 FFT 算法的计算量 .....          | 183 |
| 3.6.4 | 倒序: 输入时间序列的重排 .....               | 184 |
| 3.6.5 | 时间抽取基-2 FFT 的其他算法结构 .....         | 186 |
| 3.6.6 | 频率抽取基-2 FFT 算法 .....              | 188 |
| 3.6.7 | 计算 FFT 的 MATLAB 内部函数 .....        | 191 |
| 3.7   | 实际应用 FFT 算法时需要考虑的几个问题 .....       | 194 |
| 3.7.1 | 输入数据的采集和处理 .....                  | 194 |
| 3.7.2 | 时间抽取基-2 FFT 算法的实现 .....           | 196 |
| 3.7.3 | DFT 的处理增益 .....                   | 199 |
| 3.7.4 | FFT 计算结果的解读 .....                 | 205 |
| 3.8   | 计算 DFT 的其他快速算法 .....              | 206 |
| 3.8.1 | 混合基 FFT 算法 .....                  | 207 |
| 3.8.2 | 基 4FFT 算法 .....                   | 211 |
| 3.8.3 | 线性调频 $z$ 变换(CZT) .....            | 214 |
| 习题    | .....                             | 221 |
| 第 4 章 | 数字滤波器的结构和有限字长效应 .....             | 230 |
| 4.1   | FIR 滤波器的直接型结构和级联结构 .....          | 231 |
| 4.1.1 | FIR 直接型结构 .....                   | 231 |
| 4.1.2 | FIR 级联结构 .....                    | 232 |
| 4.2   | FIR 滤波器的格型结构 .....                | 233 |
| 4.3   | 线性相位 FIR 滤波器 .....                | 238 |
| 4.3.1 | FIR 滤波器的相位响应 .....                | 238 |
| 4.3.2 | 线性相位 FIR 滤波器 4 种不同类型的单位冲激响应 ..... | 246 |
| 4.3.3 | 线性相位 FIR 滤波器的结构 .....             | 248 |
| 4.3.4 | 线性相位 FIR 滤波器的振幅响应 .....           | 249 |
| 4.3.5 | 线性相位 FIR 滤波器的零点分布 .....           | 252 |
| 4.4   | FIR 滤波器的频率取样结构 .....              | 256 |
| 4.4.1 | 频率取样结构的组成 .....                   | 256 |
| 4.4.2 | 频率取样结构的改进 .....                   | 258 |
| 4.4.3 | 线性相位 FIR 滤波器的频率取样结构 .....         | 260 |

# 目录

|        |                          |     |
|--------|--------------------------|-----|
| 4.5    | IIR 滤波器的结构               | 262 |
| 4.5.1  | IIR 滤波器的直接型结构            | 262 |
| 4.5.2  | IIR 滤波器的并联结构             | 266 |
| 4.5.3  | IIR 滤波器的级联结构             | 270 |
| 4.6    | 全通滤波器和最小相位滤波器            | 272 |
| 4.6.1  | 全通滤波器                    | 272 |
| 4.6.2  | 最小相位滤波器                  | 274 |
| 4.6.3  | 非最小相位 IIR 滤波器的分解         | 279 |
| 4.7    | IIR 滤波器的格型结构             | 282 |
| 4.7.1  | 全极点格型滤波器                 | 282 |
| 4.7.2  | 极点-零点格型滤波器               | 285 |
| 4.8    | FIR 滤波器的有限字长效应           | 290 |
| 4.8.1  | 二进制数的表示方法                | 290 |
| 4.8.2  | 输入信号的量化误差                | 291 |
| 4.8.3  | FIR 滤波器的系数量化误差           | 297 |
| 4.8.4  | FIR 滤波器有限字长效应的统计分析       | 300 |
| 4.9    | IIR 滤波器的有限字长效应           | 303 |
| 4.9.1  | 系数量化误差对零点和极点位置的影响        | 304 |
| 4.9.2  | IIR 滤波器中乘法运算舍入噪声的统计分析    | 307 |
| 4.9.3  | IIR 滤波器中加法运算的溢出和定标       | 313 |
| 4.9.4  | 数字滤波器的浮点实现               | 319 |
| 4.10   | IIR 滤波器的零输入极限环现象         | 320 |
| 4.11   | 利用 MATLAB 实现数字滤波器的结构     | 324 |
| 4.11.1 | 级联结构                     | 324 |
| 4.11.2 | 并联结构                     | 326 |
| 4.11.3 | 格型结构                     | 329 |
| 4.12   | 利用 MATLAB 分析数字滤波器的有限字长效应 | 330 |
| 4.12.1 | 舍入和截尾量化                  | 331 |
| 4.12.2 | 滤波器系数的量化对幅度响应和极点-零点位置的影响 | 332 |
| 4.12.3 | IIR 滤波器极限环的 MATLAB 模拟    | 333 |
|        | 习题                       | 336 |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| <b>第 5 章 数字滤波器的设计</b>                        | <b>344</b> |
| 5.1 数字滤波器的设计指标                               | 345        |
| 5.1.1 因果数字滤波器的频率响应                           | 345        |
| 5.1.2 数字滤波器的设计指标                             | 349        |
| 5.2 FIR 滤波器的窗函数设计方法                          | 353        |
| 5.2.1 冲激响应截断法                                | 353        |
| 5.2.2 窗函数设计法                                 | 357        |
| 5.2.3 Kaiser 窗                               | 360        |
| 5.3 设计 FIR 滤波器的频率取样方法                        | 364        |
| 5.3.1 频率取样方法的基本原理                            | 364        |
| 5.3.2 频率取样设计方法对过渡带的优化                        | 366        |
| 5.4 设计 FIR 滤波器的最小二乘法                         | 371        |
| 5.5 最优等波纹线性相位 FIR 滤波器的设计: Parks-McClellan 算法 | 376        |
| 5.5.1 线性相位 FIR 滤波器振幅响应的统一表示                  | 376        |
| 5.5.2 Minimax 误差准则                           | 378        |
| 5.5.3 交替定理                                   | 381        |
| 5.5.4 Parks-McClellan 算法                     | 385        |
| 5.6 微分器和 Hilbert 变换器                         | 388        |
| 5.6.1 微分器                                    | 388        |
| 5.6.2 希尔伯特变换器                                | 391        |
| 5.7 窗函数法、频率取样法和最小二乘法的 MATLAB 实现              | 394        |
| 5.7.1 按照算法原理编写 m 文件                          | 394        |
| 5.7.2 Kaiser 窗滤波器设计方法的 MATLAB 实现             | 401        |
| 5.7.3 设计线性相位 FIR 滤波器的 MATLAB 函数              | 402        |
| 5.8 用 MATLAB 设计最优等波纹线性相位 FIR 滤波器             | 407        |
| 5.9 IIR 数字滤波器的一般设计方法                         | 412        |
| 5.9.1 设计 IIR 数字滤波器的两种方案                      | 412        |
| 5.9.2 模拟低通滤波器的技术指标                           | 413        |
| 5.9.3 平方幅度响应与传输函数的关系                         | 415        |
| 5.10 常用四种原型滤波器                               | 417        |
| 5.10.1 Butterworth 滤波器                       | 417        |
| 5.10.2 Chebyshev I 型滤波器                      | 422        |

# 目录

|        |                             |     |
|--------|-----------------------------|-----|
| 5.10.3 | Chebyshev II 型滤波器           | 427 |
| 5.10.4 | 椭圆滤波器                       | 428 |
| 5.11   | 模拟滤波器到数字滤波器的映射              | 431 |
| 5.11.1 | 冲激响应不变法                     | 431 |
| 5.11.2 | 双线性变换法                      | 435 |
| 5.12   | 频率变换                        | 439 |
| 5.12.1 | 模拟频率变换                      | 439 |
| 5.12.2 | 数字频率变换                      | 449 |
| 5.13   | 设计 IIR 数字滤波器的 MATLAB 方法     | 455 |
| 5.13.1 | 一般步骤                        | 455 |
| 5.13.2 | 用于设计 IIR 数字滤波器的主要 MATLAB 函数 | 460 |
| 5.14   | MATLAB 中的滤波器设计和分析工具         | 470 |
|        | 习题                          | 473 |
| 第 6 章  | 多速率数字信号处理                   | 482 |
| 6.1    | 整数倍降低取样频率                   | 483 |
| 6.2    | 整数倍提高取样频率                   | 488 |
| 6.3    | 任意有理数倍取样频率变换                | 492 |
| 6.3.1  | 单级取样频率变换                    | 492 |
| 6.3.2  | 多级取样频率变换                    | 494 |
| 6.4    | 取样频率变换的多相滤波器实现              | 495 |
| 6.4.1  | 抽取器或内插器与滤波器的级联次序            | 496 |
| 6.4.2  | FIR 滤波器的多相分解                | 497 |
| 6.4.3  | 抽取器和内插器的多相滤波器实现             | 500 |
| 6.5    | 任意倍数取样频率转换的时变滤波器实现          | 502 |
| 6.6    | 取样频率变换的 MATLAB 方法           | 506 |
| 6.6.1  | 整数倍提高取样频率                   | 506 |
| 6.6.2  | 整数倍降低取样频率                   | 509 |
| 6.6.3  | 有理数倍变换取样频率                  | 511 |
| 6.7    | 多速率信号处理的典型应用                | 514 |
| 6.7.1  | 利用取样频率变换技术设计延时器             | 514 |
| 6.7.2  | 不同取样频率数字系统之间的接口             | 515 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 6.7.3 窄带滤波器的多速率设计 .....                  | 519 |
| 6.8 过取样 ADC 和过取样 DAC .....               | 521 |
| 6.8.1 ADC 的抗混叠滤波器和 DAC 的抗影像滤波器 .....     | 521 |
| 6.8.2 过取样 ADC .....                      | 525 |
| 6.8.3 过取样 $\Sigma$ - $\Delta$ 模数转换 ..... | 531 |
| 6.8.4 带有反馈噪声整形的过取样 DAC .....             | 538 |
| 6.9 数字滤波器组 .....                         | 545 |
| 6.9.1 分析滤波器组和合成滤波器组 .....                | 545 |
| 6.9.2 滤波器组的多相滤波器结构 .....                 | 547 |
| 6.10 $L$ 带滤波器和半带滤波器 .....                | 549 |
| 6.10.1 $L$ 带滤波器 .....                    | 549 |
| 6.10.2 半带滤波器 .....                       | 551 |
| 6.11 双通道正交镜像滤波器组 .....                   | 553 |
| 6.11.1 抽取-内插滤波器组 .....                   | 553 |
| 6.11.2 双通道滤波器组的无混叠失真条件和完全重构条件 .....      | 554 |
| 6.11.3 无混叠失真双通道 QMF 组输出信号的完全重构条件 .....   | 557 |
| 6.12 完全重构双通道 FIR 滤波器组 .....              | 560 |
| 6.13 多通道正交镜像滤波器组 .....                   | 568 |
| 6.13.1 多通道滤波器组无混叠失真的条件 .....             | 569 |
| 6.13.2 多通道滤波器组的多相结构 .....                | 572 |
| 6.14 仿酉滤波器组 .....                        | 576 |
| 6.14.1 仿酉矩阵传输函数和无损系统 .....               | 576 |
| 6.14.2 完全重构仿酉滤波器组 .....                  | 577 |
| 6.14.3 双正交滤波器组 .....                     | 579 |
| 6.15 余弦调制滤波器组 .....                      | 581 |
| 习题 .....                                 | 586 |
| 附录 频率取样法设计线性相位 FIR 滤波器的过渡带优化取样值 .....    | 593 |
| 参考文献 .....                               | 597 |



# 第1章

## 概论