

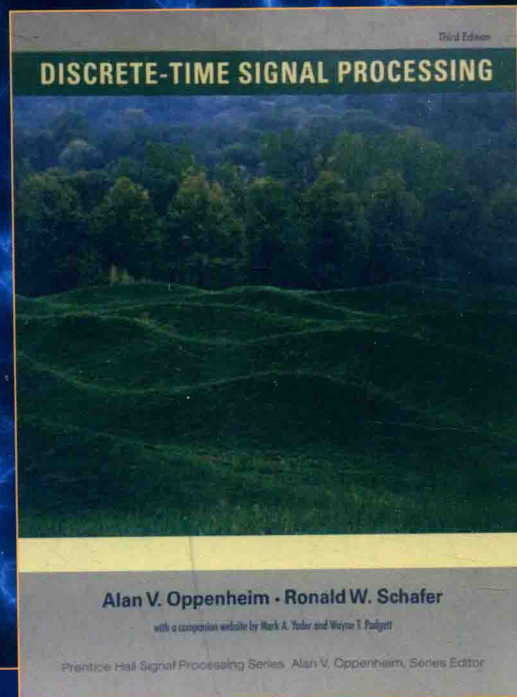
# 离散时间信号处理

(原书第3版·精编版)

[美] 艾伦 V. 奥本海姆 (Alan V. Oppenheim) 著  
[美] 罗纳德 W. 谢弗 (Ronald W. Schafer)

李玉柏 潘晔 杨鍊 廖昌俊 译

*Discrete-Time  
Signal Processing  
Third Edition*



# 离散时间信号处理

(原书第3版·精编版)

[美] 艾伦 V. 奥本海姆 (Alan V. Oppenheim) 著  
罗纳德 W. 谢弗 (Ronald W. Schafer)

李玉柏 潘晔 杨鍊 廖昌俊 译

*Discrete-Time  
Signal Processing  
Third Edition*



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

离散时间信号处理 (原书第 3 版·精编版) / (美) 艾伦 V. 奥本海姆 (Alan V. Oppenheim), 罗纳德 W. 谢弗 (Ronald W. Schafer) 著; 李玉柏等译. —北京: 机械工业出版社, 2017.1

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Discrete-Time Signal Processing, Third Edition

ISBN 978-7-111-55959-7

I. 离… II. ①艾… ②罗… ③李… III. 离散信号—时间信号—信号处理—教材  
IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 032014 号

本书版权登记号: 图字: 01-2015-5199

Authorized translation from the English language edition, entitled Discrete-Time Signal Processing, Third Edition, 978-0-13-198842-2 by Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2010, 1999, 1989.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2017.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书是信号处理领域的权威教材, 是作者在美国麻省理工学院和佐治亚理工大学教授本科生和研究生的课程的经验总结。本书阐述了离散时间系统的基本定理和性能, 包括多速率滤波、离散余弦变换、噪声整形的采样策略, 并更新了解决相关问题的实例, 指出解决问题的实际方法。

本书适合作为数字信号处理相关专业高年级本科生和研究生的教材。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

版次: 2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm×260mm 1/16

印张: 29.25

书号: ISBN 978-7-111-55959-7

定价: 119.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东



## 出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：[www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)

电子邮件：[hzsj@hzbook.com](mailto:hzsj@hzbook.com)

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章教育

华章科技图书出版中心

## 译者序

本书是以美国麻省理工学院 Alan V. Oppenheim 教授和佐治亚理工学院 Ronald W. Schaffer 教授撰写的《离散时间信号处理(第 3 版)》为基础,主要针对高年级本科生学习和掌握数字信号处理技术以及基本系统应用的特点,进行了缩编和翻译。

早在 1975 年——数字信号处理技术发展初期, Oppenheim 和 Schaffer 教授就撰写了《数字信号处理》一书,作为研究生教材。该书是这一领域的经典教材,影响巨大。随着数字信号处理技术的发展成熟,以离散时间系统为基础的应用越来越广泛,有关数字信号处理技术的课程开始在本科生中开设,于是在 1989 年他们又撰写并出版了《离散时间信号处理》,目标是作为大学高年级本科生和一年级研究生的教材,着重于基础内容的加强和更新,对一些新发展的基础性专题论述更为详细,同时大大增加例题和习题量。

后来作者根据数字信号处理技术的发展及实际教学反馈,于 1999 年修订出版了《离散时间信号处理(第 2 版)》。第 2 版保持了第 1 版的风格,但在内容处理上更加精炼,注重揭示一个学科的基础知识、基本理论、基本方法,提升学生和工程师们解决问题的能力。比如作者把一些不是本科阶段必需的内容予以剔除,例如把倒谱和同态信号处理的内容从正文中删除,放到习题中;而把多采样率信号处理、数据压缩中的余弦变换等内容引入教材;习题由第 1 版的 371 道扩大到 588 道题。随即我国就引进出版了《离散时间信号处理(第 2 版)》,该书在国内高校产生了巨大影响,成为我国本科生数字信号处理相关课程使用的最经典的教材之一。国内出版的数字信号处理的教材大部分都参考了该教材的内容组织。

又经过 10 年的教学实践,作者于 2009 年修订出版了《离散时间信号处理(第 3 版)》。第 3 版的内容更加丰富,将滤波器参数设计法(包含在 1975 年版的《数字信号处理》教材中)、倒谱分析(《离散时间信号处理(第 2 版)》删除的内容)又重新引入教材中。同时增加了章节介绍信号参数模型方法和谱分析等内容。特别是例题和习题的设计十分丰富,增加了 130 多道精选的例题和习题,习题总数达到 700 多道<sup>①</sup>,分为初级题、基本题、提高题和扩展题,对学习者的深入理解书的内容很有帮助。此外,原版书还有一个配套网站,内容丰富,配合相关软件的可视化支撑,将抽象的概念和实际信号处理问题实验结合,既可以帮助学生加深对基本概念和方法的理解,又为教师进一步提高教学效果提供了帮助。

《离散时间信号处理(第 3 版)》的扩展内容主要完善了一年级研究生相关的数字信号处理课程的内容,对于本科生的数字信号处理课程,这无疑增加了学生阅读与学习的难度,尽管作者针对高年级本科生或一年级研究生的不同需求,提出了可进行不同章节组合教学的建议。因此,为了更好地适应国内数字信号处理相关课程开设的具体情况,经过与作者的交流,以及出版社的审核,拟定了对《离散时间信号处理(第 3 版)》进行缩编的计划,并在此基础上进行翻译。

译者在考虑缩编计划时,充分保留原版中的核心概念内容,又考虑国内高校本科生的数字信号处理相关课程的开设情况,去掉了部分较深入的、专业性的理论和具体应用,比如倒谱分析和同态解卷积。同时,考虑随机信号分析的特殊性,对一些随机应用进行了简化。对第 12 章的内容进行了缩减,将希尔伯特变换的核心概念改编为 2.11 节。对

<sup>①</sup> 本中文版为精编版,对部分例题和习题有删减,故实际数与原书中的数目有出入,此处数量为原英文版中的。——编辑注

第 11 章的参数信号建模进行缩编, 重点介绍了信号的全极点建模, 将参数信号模型处理的方法基础改编为 5.8 节和 5.9 节。此外, 考虑到在一般数字信号处理的学习和教学中, 是采用从模拟信号到离散时间信号再到数字信号的步骤, 因此将原书第 3 章和第 4 章交换了顺序, 以便更加符合国内学生知识学习的习惯。对于一般高校, 若相关课程的课时有限, 可以考虑只讲授本书的 2.1~2.10 节、3.1~3.5 节、第 4 章、5.1~5.6 节、6.1~6.5 节、第 7 章、8.1~8.7 节、9.1~9.4 节、10.1~10.2 节等最基础的内容。

本书第 1 章由李玉柏翻译, 第 2 章(除 2.11 节以外的内容)以及第 3 章由廖昌俊翻译, 第 5~7 章和附录由杨鍊翻译, 其余所有内容的翻译和整理工作由潘晔完成。全书由李玉柏负责统稿并写了译者序。如有错误和不当, 敬请读者给予反馈。

李玉柏

2017 年 3 月

## 前 言

本书是于1975年出版的《数字信号处理》一书的延续。那本非常成功的教科书出现时，该技术领域还不成熟，刚刚开始进入快速发展的时期。当时，这个技术主题只在研究生阶段和为数很少的学校里讲授。1975年版的那本书正是专门为这类课程写的。目前，它仍旧在重印并依然在美国本土和国际上的许多学校中成功地使用着。

到了20世纪80年代，信号处理研究、应用和实现技术的发展速度都清晰地表明，数字信号处理(DSP)将实现并超越它在70年代就已显露出的巨大潜力。DSP所萌发出的重要性清楚地表明对原书进行修订和更新已势在必行。在筹划修订本时，由于在该技术领域以及相关课程的讲授水平和风格上都已经出现了很多变化，显然最合适的方案是在原书的基础之上重写一本新书，而同时原书仍然可以继续出售。我们将1989年出版的新书定名为《离散时间信号处理》，以强调该书所讨论的大部分理论和设计方法都是面向一般离散时间系统应用的，既可以是模拟的，也可以是数字的。

在编写《离散时间信号处理》时，我们意识到DSP的基本原理已经普遍在大学本科阶段讲授了，有时甚至作为有关离散时间线性系统的第一门课程中的一部分内容，但更为普遍的是在第三学年和第四学年稍微深入一些的课程上讲授，或者作为研究生的起始专题课来讲授。因此，在讲授线性系统、采样、多采样率信号处理、应用以及谱分析方面的内容时进行一定幅度的扩展是合适的。另外，此书还用更多的例题来强调和说明一些重要概念。我们始终把精心构造的例题和课后习题放在重要的地位，所以这一版包含了400多道习题。

尽管该技术领域在理论和应用上还在继续发展，但其包含的基本原理和基础内容大多是一样的，只是在突出的重点上、理解上和教学方法上做了一些锤炼。因此1999年出版了《离散时间信号处理》第2版。这个版本做了重要的修订，目的是让“离散时间信号处理”这一学科对于大学生和实践工程师来说都更加容易理解和接受，而没有在基本内容范围上做过多考虑。

第3版是对第2版的重要修订。根据大学本科生和一年级研究生阶段的课程讲授方法的改变以及典型课程范围的变化，编写了第3版。它继承了重视学生和实践工程师对于专题的可接受性，以及关注基本工作原理和广泛适用性的传统。新版本的一个主要特征是结合并扩充了一些更为前沿的主题以及在该领域有效开展工作所必需的基础知识。新版本对第2版的每章都进行了重要的审阅和修改，并增加了全新的一章，还有一章是在第1版的基础上做了重大更新。伴随第3版的出版，Rose-Hulman技术学院的Mark Yoder教授和Wayne Padgett教授也开发完成了一个交互性较好的配套网站。后面的“配套网站”部分对此有更加全面的说明。

自第2版以来，我们已经持续教授这门课程超过了10年，自然也为作业布置和测验出了一些新的题目。我们总是非常重视精心构造的例题和习题，所以英文原书第3版包含了从这些题目中精选出的最好的130道题目，整本书的习题总数超过了700道。包含在第2版中但未纳入第3版中的习题可以在配套网站上找到。

和本书之前版本一样，假定读者已具备高等微积分的知识背景，并对复数和复变函数基础有较好的掌握，对包括拉普拉斯变换和傅里叶变换在内的连续时间信号的线性系统理论有所了解，这些内容在大多数电气和机械工程系大学本科的课程安排中都有。同时，现在大多数大学本科课程中也普遍包含了离散时间信号与系统、离散时间傅里叶变换和连续



时间信号的离散时间处理的基础知识。

在大学本科高年级和研究生中讲授“离散时间信号处理”的经验表明，一开始对这些主题进行仔细的回顾是很有必要的，这可以让学生对基础内容的理解、对贯穿课程和课本始终的统一符号框架的熟悉，逐渐过渡到可以学习更深入的主题。在大学本科低年级课程中关于离散时间信号处理的初步介绍，最通常的做法是让学生学习求解许多数学变换问题，但在重新整理这些问题时，我们想让学生尝试对一些基本概念做更深入的推理。因此，在这一版的前5章中保留了对这些基本知识的覆盖，并通过新的例题和扩展讨论对其进行了增强。在这些章的后面几节中，会涉及一些量化噪声之类的内容，这就要求读者有随机信号方面的基础知识。第2章对此进行了简单介绍。

大约过去十年间，在DSP教学中发生了一个重大变革，那就是广泛地使用类似MATLAB、LabVIEW和Mathematica等复杂的软件包，为学生提供具有交互性的亲手操作经验。这些软件包使用起来方便简单，提供了将离散时间信号处理中的基本概念、数学公式与涉及实信号和实时系统的应用联系起来的机会。这些软件包有完备的说明文档、良好的技术支持和友好的用户界面，这些都使得学生可以在专心进行软件基础结构的深入研究和理解的基础上方便地使用它们。现在，在许多信号处理课程中都普遍包含利用一个或多个软件包实现的工程课题和练习题。当然，为了有利于学生的学习，需要对这些课题和题目进行仔细的设计，应该强调基于概念、参数等内容的实验，而不是简单地照着书本操练。令人特别振奋的是，只要安装上这样一款强大的软件包，每个学生的笔记本电脑都能变成一个可以对离散时间信号处理概念和系统进行实验的先进实验室。

作为教师，我们一直在寻找最好的方式，以利用计算机资源改善学生的学习环境。我们仍然坚信教科书是在形式上最方便而且稳定的封装知识的最好方法。教科书的发展演进应该是相对缓慢的，这样才能保证一定程度上的稳定，并让学生有时间来归纳整个技术领域的发展以及验证所提出的新思想的方法。而另一方面，计算机软件和硬件技术的发展变化很快，软件更新通常半年一次，而硬件速度仍然每年都在提高。以上这些以及互联网的使用，使得我们可以对学习环境中的交互和实验部分进行更频繁的更新。正是出于这些原因，一种很自然的讲授方式是利用不同的平台环境，一方面在教科书中陈述基本的数学公式和概念，另一方面可通过网站来呈现需要亲自动手的交互实验。

基于以上这些想法，我们完成了本书第3版的编写，其中包括离散时间信号处理领域中的基本数学知识和概念，以及一个配套网站，该网站是由Rose-Hulman技术学院的同事Mark Yoder和Wayne Padgett开发的，提供了各种用于学习的交互式软件资源，可以巩固和扩大本书的影响。后面的“配套网站”部分会更详细地描述这个网站。网站可以动态地持续更新，以快速地呈现本书作者和网站作者开发出来的新资源。该网站能灵敏地反映不断变化的硬件和软件环境，这些环境提供了对抽象概念和基于实信号处理问题实验的可视化平台。我们惊叹于该配套网站环境的无穷潜力，它极大地提高了离散时间信号处理课程的教学能力和学习能力。

本书在内容的组织上为大学本科生和研究生的使用都提供了相当大的灵活性。通常供大学本科生一学期用的选修课可以覆盖2.0~2.9节、3.0~3.6节、第4章、5.0~5.3节、6.0~6.5节、7.0~7.3节以及7.4~7.6节的简单介绍。如果学生在前面的信号与系统课程中已学过离散时间信号与系统，则可以很快地浏览第2章、第3章和第4章的内容，而留出充裕的时间来学习第8章。作为一年级研究生的课程或高年级本科生的选修课程，除了上述内容外，还可以包括第5章余下的部分，3.7节有关量化问题的简单介绍。一年级的研究生课程还应该包括在6.6~6.8节所讨论的量化问题，7.7节滤波器的讨论，以及第8章的离散傅里叶变换和第9章利用FFT计算离散傅里叶变换等内容。第10章的很多例题能有效地加强对DFT的讨论。在两学期的研究生课中，除了应包括本书的全部内容外，还可以包括另外一些更深入的主题。在所有这些章节中，每一章后面的习题都能



在借助或不借助计算机的情况下完成。另外，为了加强有关信号处理系统理论和计算机实现之间的联系，可以借助网站上列出的一些习题和工程课题。

下面对各章内容做个总结，重点强调第3版的主要变化。

第2章介绍了离散时间信号与系统的基本类型，并定义了系统的基本性质，诸如线性、时不变性、稳定性和因果性等。本书主要讨论线性时不变系统，因为有许多成熟的工具可以用于这类系统的分析与设计。尤其是在这一章中，通过卷积和(convolution sum)建立了线性时不变系统的时域表示法，并讨论了由线性常系数差分方程所描述的一类线性时不变系统。第6章还将对该类系统做更详细的论述。第2章通过离散时间傅里叶变换引入了离散时间信号与系统的频域表示法。第2章的重点是利用离散时间傅里叶变换来表示序列，也就是把序列表示为一组复指数的线性组合，以及离散时间傅里叶变换的基本性质。另外，2.11节(译者注：原书为第12章)讨论离散希尔伯特变换。这种变换出现在各种不同的实际应用中，其中包括逆滤波、实带通信号的复数表示、单边带调制技术和许多其他方面。随着日益复杂的通信系统的出现以及宽带和多带连续时间信号高效采样方法的日益丰富，对希尔伯特变换的基本理解也变得越来越重要。

在离散时间信号是通过连续时间信号周期采样而得到的情况下，第3章(译者注：原书为第4章)详细讨论了这两类信号之间的关系，其中包括奈奎斯特采样定理。另外还讨论了离散时间信号升采样和降采样，这些在多采样率信号处理系统和采样率转换中都会用到。这一章以从连续时间到离散时间转换中所遇到的某些实际问题的讨论作为结束，其中包括为避免混叠而采用的预滤波，当离散时间信号用数字表示时幅度量化效应的建模，以及在简化模数和数模转换过程中利用过采样的问题等。第3版增加了新的量化噪声仿真的例子，以及基于样条推导内插滤波器的讨论。

第4章(译者注：原书为第3章)作为傅里叶变换的推广建立了 $z$ 变换。这一章重点讲解 $z$ 变换的基本定理和性质，以及用部分分式展开法计算反变换，还提到了单边 $z$ 变换的概念。第5章将广泛深入地讨论如何利用在第2章和第4章得到的结果来表示和分析线性时不变系统。虽然对许多同学来说，第2章和第4章中的内容可能属于复习，但大部分介绍性的信号与系统课程的深度或广度都不及这两章所涵盖的内容。另外，这些章节还给出了全书会用到的符号注释。因此，我们建议学生认真学习这两章的内容，从而建立起掌握离散时间信号与系统基础知识的信心。

第5章利用了前面各章中建立的概念，详细地研究线性时不变系统的各种性质，定义了一类理想的频率选择性滤波器，并对由线性常系数差分方程所描述的系统建立了系统函数和零极点表示法，而该类系统的实现将在第6章详细讨论。同时，第5章还定义并讨论了群延迟、相位响应和相位失真，以及系统的幅度响应和相位响应之间的关系，其中包括对最小相位、全通和广义线性相位系统等的讨论。第3版的变化在于增加了一个群时延和衰减的例子，这个例子的交互性实验在配套网站上可以找到。另外，5.8节和5.9节(译者注：原书为第11章)讨论参数信号建模。从把信号表示成一个LTI系统的输出这一基本概念入手，给出了如何通过求解一组线性方程来得到信号模型各参数的过程。

第6章重点讨论了由线性常系数差分方程描述的系统，并用方框图和线性信号流图表示这类系统。本章的大部分内容是建立各种重要的系统结构，并比较它们之间的一些性质。这些讨论和各种滤波器结构的重要性都基于这样一个事实：在离散时间系统的具体实现中，系数的不准确和运算误差的影响都与所采用的具体结构密切相关。无论对于数字还是离散时间模拟实现，这些基本问题都是类似的。本章是在数字实现的范畴内，通过对数字滤波器的系数量化和运算舍入噪声影响的讨论来阐明这些问题的。

第6章主要关注的是线性常系数差分方程的表示和实现，而第7章则讨论为了逼近某一期望的系统响应而获得这类差分方程系数的步骤，其设计方法分为无限冲激响应滤波器设计和有限冲激响应滤波器设计两大类。

在连续时间线性系统理论中，傅里叶变换主要是表示信号与系统的一种分析工具。与此对照，在离散时间情况下，很多信号处理系统和算法则涉及直接计算傅里叶变换。尽管傅里叶变换本身无法计算，但它的采样形式，即离散傅里叶变换(DFT)却可以计算出来，并且对有限长信号来说，其DFT就是该信号的完全傅里叶表示。第8章详细讨论离散傅里叶变换及其性质，以及它与离散时间傅里叶变换的关系。这一章还将介绍离散余弦变换(DCT)，这一变换在类似音频和视频压缩的应用中起着非常重要的作用。

第9章将介绍并讨论用于计算或产生离散傅里叶变换的各种重要算法，其中包括Goertzel算法、快速傅里叶变换(FFT)算法和线性调频变换等。在第3版中，利用第3章讨论的基本升采样和降采样操作增加了对FFT算法推导的深入分析。第9章还将讨论，随着技术的演进，评估信号处理算法效率的重要指标发生了极大的改变。在20世纪70年代(本书产生的时代)，存储和算术计算(乘法以及浮点加法)的成本高，此时算法效率通常是用对这些资源的需求量来判断的，而如今通过增大存储量来提高信号处理算法的速度并降低实现所需的功率，已是司空见惯的事。类似地，有些时候即使可能会增大计算开销，仍然需要用多核平台进行算法的并行实现。现在，数据交换的周期数、片上通信以及所需功率，经常成为选取算法实现结构的关键度量。正如第9章所讨论的，虽然从所需乘法次数的角度来说，FFT的效率比Goertzel算法或DFT直接实现更高，但如果主要衡量指标是通信周期数，则FFT的效率更低，因为DFT直接实现或Goertzel算法的并行化程度比FFT高。

有了前面这几章，特别是第2章、第4章、第5章和第8章的背景，第10章主要讨论如何利用DFT对信号进行傅里叶分析。如果没有对前面所涉及的问题，以及对连续时间傅里叶变换、DTFT和DFT之间的关系有一个透彻的理解，那么利用DFT对一个实际信号进行分析时往往会导致混淆和曲解。第10章将会提到许多这样的问题。关于利用依时傅里叶变换中对具有时变特性的信号进行傅里叶分析的问题也将讨论一些细节。第3版中的新内容对滤波器组分析进行了更详细的讨论，包括MPEG滤波器组的举例，以及说明窗长对线性调频信号影响的依时傅里叶分析举例。

我们期盼着在教学中使用此新版教材，并希望同行和学生们可以从这些较于之前版本有所增强的内容中获益。普遍意义上的信号处理和具体的离散时间信号处理在各方面都有丰富的内容，甚至还会出现更加令人振奋的进一步发展。

Alan V. Oppenheim

Ronald W. Schaffer

Rose-Hulman 技术学院的 Mark A. Yoder 和 Wayne T. Padgett 为本书开发了一个配套网站，其网址是 [www.pearsonhighered.com/oppenheim](http://www.pearsonhighered.com/oppenheim)。该网站将持续更新，目的是对本书的内容进行增强和补充，并提供一些重要概念的可视化解释以及利用这些概念进行实践的操作环境。网站包括六个主要部分：活动图形、图形建立、基于 MATLAB 的习题、基于 MATLAB 的工程课题、演示例子以及补充的典型习题，每项内容都与书中的具体章节相对应。

### 活动图形

活动图形部分通过给出所选图形的“活动”版本来增强对书中概念的解释。利用这些图形，读者可以交互式地研究如何利用图片和音频实现参数和概念的互操作。活动图形部分是利用 NI 的 LabVIEW 信号处理工具开发的。以下的几个例子简单展示了利用网站提供的活动图形部分可以做什么。

2.3 节中给出的图 2.10a~c 展示了利用图 2.10d 中的结果进行离散卷积计算的图形方法。活动图形工具允许读者对输入信号进行选择，并手动地将反转的输入信号滑动到单位冲激响应之前，然后来观察相应的计算结果并作图。使用者可以快速地实现许多不同的配置并很快地理解图形卷积的使用方法。

5.1.2 节中的图 5.5a 给出了具有不同频率的三个冲激，它们被送入一个 LTI 系统。图 5.6 画出了 LTI 系统的输出。相关的活动图形工具允许学生通过对系统零极点的位置、幅度、频率和冲激位置进行实验来观察它们对系统输出的影响。

以上只是配套网站提供的基于网页的众多活动图形中的几个例子。

### 图形建立

图形建立工具是对活动图形概念的进一步扩展。它指导学生利用 MATLAB 工具对选定的书中图形进行重新生成，以加强对基本概念的理解。图形建立工具并不是简单地给出构建一幅图形的具体步骤，而是在假设对 MATLAB 有基本了解的前提下，引入新的 MATLAB 命令和技术，用来创建图形。这样不仅可以强化信号处理概念，还可以训练信号处理方面的 MATLAB 使用技巧。例如，2.1 节中的图 2.3 和图 2.5 画出了几个序列，相应的图形建立工具引入 MATLAB 作图命令对图形进行标注，包括希腊字符和图例添加。然后，图形建立工具将该技术用于绘制图形。群时延图形建立(见图 5.5)示例中包含了重建上述活动图形工具的指令。它们不是给出各步骤的指令，而是引入了新的 MATLAB 命令，并给出了实验时有相当大自由度的重建图形方法的建议。

### 基于 MATLAB 的习题

配套网站通过 MATLAB 课后作业部分，提供了一种将 MATLAB 与习题结合起来的基本框架。该框架的一个方面就是利用习题来练习使用 MATLAB 工具，在某种程度上与图形建立工具风格一致。这些习题与不使用 MATLAB 的习题非常相似，只是采用了 MATLAB 之后使得某些部分更容易实现，例如对结果作图等。第二个方面是采用 MATLAB 可以研究和解决不能用数学分析方法解决的问题。与本书中的基本习题相比较而言，MATLAB 习题都是用于课堂测试的，因此通常比较短，且需要使用者利用



MATLAB 工具来完成简单的信号处理任务。这些习题的范围适中，是每周课后作业的几个习题中的典型习题。其中一部分习题与书中的分析习题直接关联，而另一部分则是完全独立的。许多习题将分析结果与 MATLAB 结合起来，目的在于强调两种方法彼此间的互补作用。

## 基于 MATLAB 的工程课题

基于 MATLAB 的工程课题部分涵盖了比习题更长和更复杂的工程课题或练习。这些工程课题从比本书更深入的角度来研究一些重要概念，相对范围更广。各工程课题与书中的章节相对应，一旦掌握了相关章节的内容，便可使用工程课题。例如，第一个工程课题在某种程度上说是天然的教程，可以在任何阶段使用。它介绍了 MATLAB 软件并展示了如何将其用于创建和处理离散时间信号与系统。在这个工程课题里假设学生已经有一定的编程经验，但不一定局限于 MATLAB 编程。其他许多工程课题则需要一些滤波器设计技能，因此它们与第 7 章(滤波器设计技术)或后面的章节相关联。它们研究的课题包括 FIR 和 IIR 滤波器设计、用于采样率变换的滤波器设计、关于人类听不到的信号中相位的“Folk 理论”测试、通过去噪增强语音、实现去噪的硬件设计及频谱估计等。所有这些课题都已经过了课堂试验，其中某些题目还被包含进了学生相关的出版物中。

## 演示例子

演示部分是与某些特殊章节相关的交互性示范说明。不同于活动图形工具，演示工具并不是直接与一幅给定的图像紧密联系的，而是用于阐明一个更大的想法，这种想法在学生完成了书中内容的学习后便能够理解。例如，一个演示例子说明了在保持带限脉冲形状中利用线性相位滤波器的重要性。

## 补充的典型习题

网站的第六个重要部分收集了在本书第 2 版中为了给新习题腾出空间而删掉的习题，这些习题是对书中习题的补充。每个习题都以 .pdf 或者 .tex 格式与所需图形文件结合的形式给出。

综上所述，该配套网站提供了一系列与本书紧密结合的丰富资料，这些资料从强化新概念的活动图形部分延伸到可以挑战学生超越教材而提出新想法的基于 MATLAB 的工程课题部分。随着本书作者以及网站开发者 Mark Yoder 和 Wayne Padgett 不断研究出新的教学资料，该网站也会继续向前发展。

Pearson 在全球提供了许多不同产品以方便学习者。在美国以外的国家，由于版权和许可限制，与本书相关的一些产品和服务也许不可用。如果读者遇到这类问题，可以通过访问 [www.pearsonhighered.com/international](http://www.pearsonhighered.com/international) 联系当地办公室或联络当地的 Pearson 代表。

## 致 谢

本书是从前两个版本(1989年, 1999年)发展而来的, 它们都源自于我们的第一本书《数字信号处理》(1975年)。许多对前期工作给予帮助、支持和贡献的同事、学生和朋友的影响和作用在这个新版本中仍然显著, 这里向在之前版本中明确表示过感谢的人再次表达深深的谢意。

在整个职业生涯中, 我们都非常幸运地得到了很多特别的教导。在此分别感谢几个对我们的生活和职业有重大影响的人。

Alan Oppenheim 在研究生期间以及他的整个学术生涯中都得到了 Amar Bose 教授、Thomas Stockham 教授和 Ben Gold 博士的特别指导和深刻影响。Alan 在担任 Bose 教授教学助理以及博士研究生的几年时间里, Bose 教授启发性的教学方法、富有创造性的研究风格和做任何事情都坚守的异常严谨的准则都给了 Alan 极大的影响。在 Alan Oppenheim 职业生涯的早期, 还非常有幸地与 Ben Gold 博士和 Thomas Stockham 教授建立了紧密的合作伙伴关系。Ben 所给予的莫大鼓励和榜样模范作用对 Alan 研究风格的形成有着重要影响。Thomas Stockham 也同样给予了重要的指导、支持和鼓励, 和 Alan 成为好朋友的同时也成为其另一个了不起的学习榜样。这些优秀导师的影响贯穿于整本书中。

在对 Ronald Schafer 产生影响的众多老师和导师之中, 最值得一提的是 Levi T. Wilson 教授、Thomas Stockham 教授和 James L. Flanagan 博士。是 Wilson 教授将一个天真的小镇男孩带领进数学和科学的奇妙世界, 改变了男孩的人生, 令其永生难忘。他对于教学的投入给人极大的鼓舞, 让人无法抗拒。Stockham 教授是一位伟大的老师、一位患难之交、一位有益的伙伴和一位出色的富有创造力的工程师。James Flanagan 是语音科学和工程领域的巨人, 对于所有与其共同工作过的人来说, 能得到他的激励都是非常幸运的。并不是所有伟大的老师都冠有“教授”的头衔, James Flanagan 使 Ronald 和其他许多人懂得了仔细思考的价值、致力于学习的价值以及清楚而明晰地写作和表达的价值。Ronald Schafer 直率地承认, 他学习了这些伟大导师身上的许多思考和表达习惯, 并坚信他们并不会介意。

在学术生涯中, 麻省理工学院和佐治亚理工学院为我们的研究和教学工作提供了一个激励环境, 并对这项不断发展的任务提供了鼓励和支持。自 1977 年以来, Alan Oppenheim 已经在 Woods Hole 海洋学会(WHOI)度过了几个公休假和几乎每一个夏天, 对于这种特有的机会和协作, 他表示深深的感激。本书各个版本的许多撰写都是在那些期间以及在良好的 WHOI 环境中完成的。

在麻省理工学院和佐治亚理工学院, 我们都获得了来自不同方面的大量资金支持。Alan Oppenheim 特别要感谢来自 Ray Stata 先生和模拟仪器公司(ADI)、Bose 基金以及 Ford 基金等麻省理工学院各种不同形式的资助研究和教学经费的支持。同时还要感谢德州仪器(TI)公司对我们的教学和研究工作给予的支持。特别是, 德州仪器公司的 Gene Frantz 是我们在各自研究机构里工作和进行普遍 DSP 教育的指定支持者。Ronald Schafer 还要感谢 John 和 Mary Franklin 基金的慷慨支持, 该基金在佐治亚理工学院设立了 John 和 Marilu McCarty 教授职位。对于佐治亚理工学院 ECE 学院的长期主管 Demetrius Paris 以及 Franklin 基金的 W. Kelly Mosley 和 Marilu McCarty, 给予了超过 30 年的友谊和大力支持, Ronald Schafer 表示由衷的感谢。Son Schafer 感激有机会成为 Hewlett-Packard

(HP)实验室研究团队的成员。基于多年来在佐治亚理工学院的研究支持, Schafer 于 2004 年成为了一名 HP 院士。如果没有 HP 实验室主管人员 Fred Kitson、Susie Wee 和 John Apostolopoulos 的鼓励和支持, 本书第 3 版将无法顺利完成。

我们与 Prentice Hall 的合作开始于几十年前, 即 1975 年第一本书出版时, 在本书 3 个版本以及其他著作的出版过程中我们仍然继续保持着合作。对于与 Prentice Hall 的共事我们感到特别幸运。在本书和许多其他写作项目中, Marcia Horton 和 Tom Robbins 给予的鼓励和支持, 以及在本书第 3 版中 Michael McDonald、Andrew Gilfillan、Scott Disanno 和 Clare Romeo 所提供的鼓励与帮助, 极大地增强了作者写作和完成该项工作的乐趣。

同之前的版本一样, 在第 3 版的出版过程中我们非常荣幸地得到了许多同事、学生和朋友们帮助。非常感谢他们耗费了大量的宝贵时间帮助我们完成这项工作。特别要对如下诸位表示感谢:

感谢 John Buck 教授在第 2 版的筹备过程中发挥的巨大作用, 以及其在第 2 版的整个生命过程中持续不断付出的时间和努力。

感谢 Vivek Goyal 教授、Jae Lim 教授、Gregory Wornell 教授、Victor Zue 教授以及 Babak Ayazifar 博士、Soosan Beheshti 博士和 Charles Rohrs 博士, 他们在麻省理工学院曾用过本书不同的版本进行教学, 感谢他们给本书提出的诸多有益评价和建议。

感谢 Tom Barnwell、Russ Mersereau 和 Jim McClellan 教授, 他们是 Ronald Schafer 的老朋友和同事, 他们经常用本书的不同版本来教学, 对书的许多方面都有影响。

感谢 Rose-Hulman 技术学院的 Bruce Black 教授, 他精心准备了十年来最有价值的练习题, 并从中选出最好的, 更新整合到本书的各章节中。

感谢 Mark Yoder 教授和 Wayne Padgett 教授, 他们为这一版本的开发了一个优秀的配套网站。

感谢 Ballard Blair 帮助更新了参考文献。

感谢 Eric Strattman、Darla Secor、Diane Wheeler、Stacy Schultz、Kay Gilstrap 和 Charlotte Doughty, 他们为本修订本的准备给予了管理方面的帮助, 并对我们的教学活动提供持续的支持。

感谢 Tom Baran, 他解决了与这一版本文件管理相关的许多计算机问题, 并在部分章节的例题方面做了大量工作。

感谢 Shay Maymon, 他细心地通读了本书的大部分章节, 重做了许多较深入章的习题, 给出了重要的修正和建议。

感谢以下各位帮助仔细校对了清样: Berkin Bilgic、Albert Chang、Myung Jin Choi、Majid Fozunbal、Reeve Ingle、Jeremy Leow、Ying Liu、Paul Ryu、Sanquan Song、Dennis Wei 和 Zahi Karam。

感谢许多教学助理, 他们同我们一起工作, 在麻省理工学院和佐治亚理工学院进行本课程的教学, 感谢他们对于本版本所给予的直接或间接的影响。



# 目 录

出版者的话  
译者序  
前言  
配套网站  
致谢

第1章 绪论	1
第2章 离散时间信号与系统	7
2.0 引言	7
2.1 离散时间信号	7
2.2 离散时间系统	11
2.2.1 无记忆系统	12
2.2.2 线性系统	13
2.2.3 时不变系统	14
2.2.4 因果性	15
2.2.5 稳定性	15
2.3 线性时不变系统	16
2.4 线性时不变系统的性质	20
2.5 线性常系数差分方程	24
2.6 离散时间信号与系统的频域表示	27
2.6.1 线性时不变系统的特征函数	27
2.6.2 突然加上复指数输入	30
2.7 用傅里叶变换表示序列	32
2.8 傅里叶变换的对称性质	36
2.9 傅里叶变换定理	38
2.9.1 傅里叶变换的线性特点	39
2.9.2 时移和频移定理	39
2.9.3 时间翻折定理	39
2.9.4 频域微分定理	40
2.9.5 帕斯瓦尔定理	40
2.9.6 卷积定理	40
2.9.7 调制或加窗定理	41
2.10 离散时间随机信号	43
2.11 离散希尔伯特变换	47
2.11.1 因果序列傅里叶变换实部和虚部的充分性	47
2.11.2 复序列的希尔伯特变换关系	49

2.11.3 带通信号的表示	51
2.12 小结	53
习题	54
第3章 连续时间信号的采样	69
3.0 引言	69
3.1 周期采样	69
3.2 采样的频域表示	70
3.3 由样本重构带限信号	74
3.4 连续时间信号的离散时间处理	76
3.4.1 连续时间信号的离散时间LTI处理	77
3.4.2 冲激响应不变	80
3.5 离散时间信号的连续时间处理	82
3.6 利用离散时间处理改变采样率	84
3.6.1 采样率按整数因子减小	85
3.6.2 采样率按整数因子增加	88
3.6.3 简单而实用的内插滤波器	90
3.6.4 采样率按非整数因子变化	92
3.7 模拟信号的数字处理	94
3.7.1 消除混叠的预滤波	94
3.7.2 模拟到数字转换	96
3.7.3 量化误差分析	100
3.7.4 D/A转换	104
3.8 小结	106
习题	107
第4章 $z$ 变换	119
4.0 引言	119
4.1 $z$ 变换	119
4.2 $z$ 变换收敛域的性质	126
4.3 反 $z$ 变换	129
4.3.1 观察法	129
4.3.2 部分分式展开法	130
4.3.3 幂级数展开法	133
4.4 $z$ 变换性质	134
4.4.1 线性	135

4.4.2 时移 .....	135	5.8.3 全极点模型的线性 预测结构 .....	189
4.4.3 用指数序列相乘 .....	136	5.9 全极点谱分析 .....	189
4.4.4 $X(z)$ 的微分 .....	137	5.10 小结 .....	192
4.4.5 复数序列的共轭 .....	138	习题 .....	193
4.4.6 时间翻折 .....	138	<b>第6章 离散时间系统的结构</b> .....	211
4.4.7 序列卷积 .....	138	6.0 引言 .....	211
4.4.8 $z$ 变换性质总结 .....	139	6.1 线性常系数差分方程的方框图 表示 .....	212
4.5 $z$ 变换与 LTI 系统 .....	140	6.2 线性常系数差分方程的信号 流图表示 .....	215
4.6 小结 .....	141	6.3 IIR 系统的基本结构 .....	218
习题 .....	142	6.3.1 直接型 .....	218
<b>第5章 线性时不变系统的变换域 分析</b> .....	148	6.3.2 级联型结构 .....	219
5.0 引言 .....	148	6.3.3 并联型结构 .....	221
5.1 LTI 系统的频率响应 .....	148	6.3.4 IIR 系统中的反馈 .....	222
5.1.1 频率响应的相位延迟和 群延迟 .....	148	6.4 转置形式 .....	223
5.1.2 群延迟和衰减影响的说明 .....	150	6.5 FIR 系统的基本网络结构 .....	225
5.2 用线性常系数差分方程描述 系统 .....	153	6.5.1 直接型 .....	225
5.2.1 稳定性和因果性 .....	154	6.5.2 级联型 .....	226
5.2.2 逆系统 .....	155	6.5.3 线性相位 FIR 系统的结构 .....	226
5.2.3 有理分式系统函数的冲激 响应 .....	157	6.6 有限精度数值效应概述 .....	227
5.3 有理分式系统函数的频率 响应 .....	158	6.6.1 数的表示 .....	228
5.3.1 一阶系统的频率响应 .....	159	6.6.2 实现系统中的量化 .....	230
5.3.2 多个零极点情况举例 .....	162	6.7 系数量化效应 .....	231
5.4 幅度与相位的关系 .....	164	6.7.1 IIR 系统中的系数量化效应 .....	232
5.5 全通系统 .....	166	6.7.2 一个椭圆滤波器系数量化的 例子 .....	233
5.6 最小相位系统 .....	169	6.7.3 量化的二阶节的极点 .....	235
5.6.1 最小相位系统和全通系统的 分解 .....	170	6.7.4 FIR 系统中的系数量化 效应 .....	236
5.6.2 非最小相位系统的频率 补偿 .....	171	6.7.5 一个最佳 FIR 滤波器的量化 举例 .....	237
5.6.3 最小相位系统的性质 .....	174	6.7.6 线性相位的保持 .....	240
5.7 具有广义线性相位特性的 线性系统 .....	176	6.8 数字滤波器中的舍入噪声 效应 .....	241
5.7.1 线性相位系统 .....	176	6.8.1 直接型 IIR 结构的分析 .....	241
5.7.2 广义的线性相位 .....	178	6.8.2 IIR 系统定点实现中的幅度 加权 .....	246
5.7.3 因果的广义线性相位系统 .....	180	6.8.3 一个级联 IIR 结构的分析 举例 .....	248
5.7.4 FIR 线性系统与最小相位系统的 关系 .....	184	6.8.4 直接型 FIR 系统的分析 .....	252
5.8 信号的全极点模型 .....	186	6.8.5 离散时间系统的浮点实现 .....	253
5.8.1 最小平方近似 .....	187	6.9 IIR 数字滤波器在定点实现中的 零输入极限环 .....	254
5.8.2 最小平方反模型 .....	187		

6.9.1 由舍入和截尾引起的 极限环 .....	254	8.5 有限长序列的傅里叶表示: 离散傅里叶变换 .....	330
6.9.2 由溢出而引起的极限环 .....	255	8.6 离散傅里叶变换的性质 .....	333
6.9.3 消除极限环 .....	256	8.6.1 线性 .....	333
6.10 小结 .....	257	8.6.2 序列的循环移位 .....	334
习题 .....	257	8.6.3 对偶性 .....	336
<b>第7章 滤波器设计方法</b> .....	<b>270</b>	8.6.4 对称性 .....	336
7.0 引言 .....	270	8.6.5 循环卷积 .....	338
7.1 滤波器指标 .....	270	8.6.6 离散傅里叶变换的性质 汇总 .....	341
7.2 用连续时间滤波器来设计 离散时间 IIR 滤波器 .....	272	8.7 用离散傅里叶变换实现线性 卷积 .....	341
7.2.1 用冲激响应不变法设计 滤波器 .....	272	8.7.1 两个有限长序列的线性 卷积 .....	342
7.2.2 双线性变换法 .....	277	8.7.2 循环卷积作为带有混叠的 线性卷积 .....	342
7.3 离散时间巴特沃兹、切比雪夫和 椭圆型滤波器 .....	279	8.7.3 用 DFT 实现线性时不变 系统 .....	346
7.4 低通 IIR 滤波器的频率变换 ..	288	8.8 离散余弦变换 .....	349
7.5 利用窗函数法设计 FIR 滤波器 .....	292	8.8.1 DCT 的定义 .....	349
7.5.1 常用窗的特性 .....	293	8.8.2 DCT-1 和 DCT-2 的定义 .....	350
7.5.2 加入广义线性相位 .....	295	8.8.3 DFT 与 DCT-1 的关系 .....	352
7.5.3 Kaiser 窗滤波器设计法 .....	297	8.8.4 DFT 和 DCT-2 的关系 .....	352
7.6 利用 Kaiser 窗函数法设计 FIR 滤波器举例 .....	299	8.8.5 DCT-2 的能量压缩性质 .....	353
7.6.1 低通滤波器 .....	299	8.8.6 DCT 的应用 .....	355
7.6.2 高通滤波器 .....	300	8.9 小结 .....	356
7.6.3 离散时间微分器 .....	302	习题 .....	356
7.7 IIR 和 FIR 离散时间滤波器的 总结 .....	304	<b>第9章 离散傅里叶变换的计算</b> ..	<b>371</b>
7.8 小结 .....	304	9.0 引言 .....	371
习题 .....	304	9.1 直接计算离散傅里叶变换 .....	371
<b>第8章 离散傅里叶变换</b> .....	<b>320</b>	9.1.1 由定义式直接计算 DFT .....	372
8.0 引言 .....	320	9.1.2 Goertzel 算法 .....	372
8.1 周期序列的表示: 离散傅里叶 级数 .....	320	9.1.3 同时利用对称性和周期性 .....	374
8.2 离散傅里叶级数的性质 .....	323	9.2 按时间抽取的 FFT 算法 .....	375
8.2.1 线性 .....	323	9.2.1 FFT 的推广与编程实现 .....	379
8.2.2 序列的移位 .....	323	9.2.2 同址计算 .....	379
8.2.3 对偶性 .....	323	9.2.3 其他形式 .....	381
8.2.4 对称性 .....	324	9.3 按频率抽取的 FFT 算法 .....	383
8.2.5 周期卷积 .....	324	9.3.1 同址计算 .....	384
8.2.6 周期序列 DFS 表示的性质 汇总 .....	325	9.3.2 其他形式 .....	385
8.3 周期信号的傅里叶变换 .....	326	9.4 实际考虑 .....	386
8.4 对傅里叶变换采样 .....	328	9.4.1 标号 .....	386
		9.4.2 系数 .....	387
		9.5 更一般的 FFT 算法 .....	387
		9.5.1 $N$ 为复合数的算法 .....	387