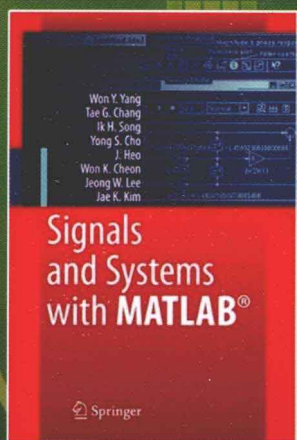


国外电子与通信教材系列

 Springer

# 信号与系统 (MATLAB<sup>®</sup> 版)

Signals and Systems with MATLAB<sup>®</sup>



[韩]

Won Y. Yang    Tae G. Chang  
Ik H. Song    Yong S. Cho  
Jun Heo    Won G. Jeon  
Jeong W. Lee    Jae K. Kim

著

郑宝玉 等译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

# 信号与系统 ( MATLAB<sup>®</sup> 版 )

Signals and Systems with MATLAB<sup>®</sup>

[ 韩 ]      Won Y. Yang      Tae G. Chang  
Ik H. Song      Yong S. Cho      著  
Jun Heo      Won G. Jeon  
Jeong W. Lee      Jae K. Kim

郑宝玉      等译

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了离散时间信号分析和处理的基本概念、基本分析方法和处理技术。全书共 8 章,内容包括信号与系统概论、连续时间傅里叶分析与离散时间傅里叶分析、 $z$  变换、取样与重建、连续时间系统与离散时间系统、模拟与数字滤波器设计、系统状态空间分析。为了便于信号与系统的分析和设计,书中还介绍了目前国际流行的 MATLAB 仿真软件及典型应用实例。

全书构思新颖、概念清晰、内容精练、论述严谨,反映了信号与系统领域中的基本内容。每章附有习题,便于读者巩固所学的概念和方法,了解基本理论的应用,提高分析问题和解决问题的能力。附录详尽给出了各种变换表、常用数学公式、MATLAB 程序及信号处理与通信用 MATLAB 和 Simulink 模块等,便于读者查阅。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、自动化、生物医学工程、计算机等专业的本科生教材或教学参考书,也可供有关科技人员自学参考使用。

Translation from the English language edition;

Signals and Systems with MATLAB<sup>®</sup> by Won Y. Yang, Tae G. Chang, Ik H. Song, Yong S. Cho, Jun Heo, Won G. Jeon, Jeong W. Lee, Jae K. Kim

Copyright © 2009 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Springer is as a part of Springer Science + Business Media

All rights reserved

本书简体中文专有翻译出版权由 Springer Science + Business Media 授予电子工业出版社,专有出版权受法律保护。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2010-0520

## 图书在版编目(CIP)数据

信号与系统: MATLAB 版/(韩)杨(Yang, W. Y.)等著;郑宝玉等译. —北京:电子工业出版社, 2012. 7  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Signals and Systems with MATLAB

ISBN 978-7-121-17570-1

I. ①信… II. ①杨… ②郑… III. ①Matlab 软件-高等学校-教材 IV. ①TP317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 155067 号

策划编辑: 杨丽娟

责任编辑: 许菊芳

印 刷:

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 21.25 字数: 544 千字

印 次: 2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

## 译 者 序

信息科学与技术研究的核心内容是信息的获取、传输(存储)与处理等。信号是信息的载体,系统是信息处理的手段。因此,研究信号与系统的基本理论与方法的教材,应跟踪信息技术发展趋势,积极吸收国内外最新教研成果。国际知名的出版公司 Springer 近期出版的《信号与系统(MATLAB 版)》一书,将“信号与系统”、“信号处理”和“MATLAB 仿真方法”进行了整合,为我们进行“信号与系统”课程体系改革和教学内容更新提供了参考。与现有的“信号与系统”教材相比,该书有如下三个特点:

1. 在观念上,整合了“信号与系统”的基本内容和“信号处理”的核心内容,并将“理论联系实际”和“少而精”的思想融入教材中,对教材的体系和内容进行了科学的组织,体现了教材不仅是人类知识的载体,也是人类思维方法和认知过程的载体,符合认知规律。

2. 在体系上,形成了信号与系统、信号处理的新体系。它有两个特点:首先,突出信号分析是系统分析和信号处理的基础,较好地实现了信号、系统和处理的有机结合,原理、方法和应用的有机结合;其次,将连续时间信号与系统和离散时间信号与系统并行介绍,大大节省了讲授这两种相似内容所需的时间和篇幅,而且可使读者通过比较这两种信号与系统,知其一便知其二,加深对二者间联系的理解。

3. 在内容上,体现经典与现代相结合、基本理论与工程技术相结合、解析方法与计算机辅助方法相结合的特点,突出理论与方法中所蕴涵的数学概念、物理概念和工程概念,体现基础性、先进性和实用性。例如,在信号分析中,以全新的方式阐述了信号的取样(包括上取样、下取样、欠取样和过取样)与重建问题;在信号与系统分析和滤波器设计及应用中,大量使用了 MATLAB 仿真软件。这样的内容安排,能同时满足我国通信、电子信息工程、生物医学工程等专业和自动化、电机、计算机等专业(即两种组课方案<sup>①</sup>)的基本要求。

本书由南京邮电大学郑宝玉教授主持翻译,并负责全书通稿和审校。除主持者外,为本书提供初稿和做出贡献的还有:陈守宁、魏浩、元超、张卉、刘宇、解培中、孔凡坤、朱艳、吉晓东、褚御芝等。此外,赵生妹教授对本书译稿的部分内容提出了修改意见。在本书翻译过程中,电子出版社的同仁给予了大力支持和帮助,责任编辑付出了辛勤的劳动和汗水,在此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,书中难免有欠妥之处,望读者不吝赐教。

译 者  
2012 年 5 月

<sup>①</sup> 郑君里、谷源涛,“信号与系统课程历史变革与进展”[J],电气电子教学学报,Vol. 34, No. 2, 2012 年 4 月。

# 前 言

本书主要是为学习“信号与系统”课程的低年级学生编写的。对于想要了解一些信号处理概念的工程师和科研人员,本书也很有参考价值。读者需要复数、高等数学(如微分,积分)、线性代数、差分方程、拉普拉斯变换及 MATLAB 等方面的相关基础。掌握一些电路与系统方面的知识,对于理解本书的内容也是非常有益的。

掌握信号与系统的知识对于电子工程专业的学生是至关重要的。本书主要目的是为读者学习后续课程(如信号处理、通信和控制等)做好准备。内容覆盖从信号与系统的基本概念到如何使用 MATLAB 和 Simulink 工具进行分析信号和滤波器设计。本书的主要特点如下。

1. 书中不仅介绍了四种傅里叶分析工具:CTFS(连续时间傅里叶级数)、CTFT(连续时间傅里叶变换)、DFT(离散时间傅里叶变换)、DTFS(离散时间傅里叶级数),而且阐述了它们之间的关系,便于读者理解为什么只有 DFT 用于实际的频谱分析,它与其他三种傅里叶分析工具为什么有区别以及有什么区别,并进一步思考如何通过 DFT 分析减少差别,以获得更好的频谱特性。
2. 书中把连续时间与离散时间信号/系统平行介绍,这样不仅可以节省解释这两种相似内容的时间和篇幅,且不至于引起混淆,还可以加深读者对相关概念的理解。
3. 书中包含了大量高年级课程(例如信号处理、通信和控制)的理论基础和数学推导内容,以最大限度地减低其数学难度和计算负担。
4. 书中大多数例题和习题用来说明关键的概念,或者引出与实际应用的关系,以激发读者的兴趣,并使读者明白为什么要研究这些例子和问题。
5. 书中广泛使用 MATLAB,它有双重目的:一是使读者明白 MATLAB 是计算和制图方面一种强有力的软件工具;二是使读者对卷积、相关、时域/频域响应、傅里叶分析等概念及其物理意义、解释和应用有所了解。
6. 书中附录包括信号处理 MATLAB 和 Simulink 模块,它可作为手册使用。作者并不要求读者精通 MATLAB,但希望他们能对作为信号分析和滤波器设计工具的 MATLAB 和 Simulink 感兴趣,借此理解一些理论上或实际上重要例题/习题的 MATLAB 程序,并能修改这些程序用以解决自己的问题。

本书内容来源于许多优秀科学家、学者、研究者的论著,谨向他们表示深切的感谢。同时,还要感谢本书的审阅人员,他们提出的重要意见和建议大大丰富了本书的内容。



同样要感谢韩国中央大学电子与电气工程学院的老师为我们提供的良好学术环境。此外,还要感谢我们的家人与朋友,如果没有他们的理解支持,这本书也不能完成。要特别感谢KETI(韩国电子技术协会)的高级研究学者 Yong Suk Park 在修订内容时给予的重要帮助。我们也非常感谢编辑和出版此书的施普林格出版社里的人员,包括克里斯托弗·鲍门博士和迪维亚·斯瑞尼瓦桑女士。

欢迎大家对此书提出问题、意见和建议,请将这些寄到 [wyyang53@hanmail.net](mailto:wyyang53@hanmail.net) 邮箱。

Won Y. Yang  
Tae G. Chang  
Ik H. Song  
Yong S. Cho  
Jun Heo  
Won G. Jeon  
Jeong W. Lee  
Jae K. Kim

#### Limits of Liability and Disclaimer of Warranty of Software

The reader is expressly warned to consider and adopt all safety precautions that might be indicated by the activities herein and to avoid all potential hazards. By following the instructions contained herein, the reader willingly assumes all risks in connection with such instructions.

The authors and publisher of this book have used their best efforts and knowledge in preparing this book as well as developing the computer programs in it. However, they make no warranty of any kind, expressed or implied, with regard to the programs or the documentation contained in this book. Accordingly, they shall not be liable for any incidental or consequential damages in connection with, or arising out of, the readers' use of, or reliance upon, the material in this book.

Questions about the contents of this book can be mailed to [wyyang.53@hanmail.net](mailto:wyyang.53@hanmail.net).

Program files in this book can be downloaded from the following website:

< <http://wyyang53.com.ne.kr/> >

MATLAB<sup>®</sup> and Simulink<sup>®</sup> are registered trademarks of The MathWorks, Inc. For MATLAB and Simulink product information, please contact:

The MathWorks, Inc.  
3 Apple Hill Drive  
Natick, MA 01760-2098 USA  
☎: 508-647-7000, Fax: 508-647-7001  
E-mail: [info@mathworks.com](mailto:info@mathworks.com)  
Web: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

The use of general descriptive names, registered names, trademarks, etc. in this publication does not imply, even in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protective laws and regulations and therefore free for general use.

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

# 目 录

<b>第 1 章 信号与系统</b> .....	1
1.1 信号 .....	1
1.2 系统 .....	8
1.3 由微分/差分方程描述的系统 .....	22
1.4 反卷积与相关 .....	27
1.5 小结 .....	32
习题 .....	33
<b>第 2 章 连续时间傅里叶分析</b> .....	44
2.1 周期信号的连续时间傅里叶级数(CTFS) .....	44
2.2 非周期信号的连续时间傅里叶变换 .....	52
2.3 周期信号的(广义)傅里叶变换 .....	55
2.4 连续时间傅里叶变换举例 .....	55
2.5 连续时间傅里叶变换的性质 .....	61
2.6 极坐标表示和 CTFT 的图形 .....	68
2.7 小结 .....	70
习题 .....	70
<b>第 3 章 离散时间傅里叶分析</b> .....	92
3.1 离散时间傅里叶变换(DTFT) .....	92
3.2 离散时间傅里叶变换的性质 .....	98
3.3 DTFT 的极坐标表示和作图 .....	102
3.4 离散傅里叶变换(DFT) .....	104
3.5 CTFS, CTFT, DTFT 和 DFT 的关系 .....	113
3.6 快速傅里叶变换(FFT) .....	117
3.7 DFT 结果的解释 .....	121
3.8 信号运算对 DFT 频谱的影响 .....	126
3.9 短时傅里叶变换-谱图 .....	128
3.10 小结 .....	129
习题 .....	130
<b>第 4 章 <math>z</math> 变换</b> .....	147
4.1 $z$ 变换的定义 .....	147
4.2 $z$ 变换的性质 .....	150

4.3	$z$ 反变换	154
4.4	应用 $z$ 变换分析 LTI 系统	158
4.5	$z$ 变换的几何计算	163
4.6	对称序列的 $z$ 变换	167
4.7	小结	169
	习题	170
<b>第 5 章</b>	<b>取样和重建</b>	<b>176</b>
5.1	数模(D/A)转换	176
5.2	模数(A/D)转换	177
5.3	取样	181
5.4	重建和内插	186
5.5	取样保持(S/H)运算	193
5.6	小结	193
	习题	193
<b>第 6 章</b>	<b>连续时间系统和离散时间系统</b>	<b>196</b>
6.1	离散时间等效的定义	196
6.2	输入响应不变法	198
6.3	离散化方法	200
6.4	离散时间等效系统的时间和频率响应	207
6.5	$s$ 平面极点与 $z$ 平面极点的关系	209
6.6	星号变换和脉冲转移函数	210
	习题	213
<b>第 7 章</b>	<b>模拟滤波器和数字滤波器</b>	<b>217</b>
7.1	模拟滤波器设计	217
7.2	数字滤波器的设计	227
7.3	如何使用 SP 工具(SPTool)	249
	习题	254
<b>第 8 章</b>	<b>LTI 系统的状态空间分析</b>	<b>256</b>
8.1	状态空间描述—状态方程和输出方程	256
8.2	LTI 状态方程的解	257
8.3	转移函数和特征方程	261
8.4	连续时间状态方程的离散化	262
8.5	状态空间描述—相似变换	267
8.6	小结	269
	习题	269

附录 A 拉普拉斯变换 .....	273
附录 B 各种变换表 .....	282
附录 C 复数、向量和矩阵的运算 .....	288
附录 D 常用数学公式 .....	295
附录 E MATLAB .....	296
附录 F Simulink .....	319
参考文献 .....	323
MATLAB 函数索引 .....	324
示例索引 .....	326
注释索引 .....	327

# 第 1 章 信号与系统

## 1.1 信号

### 1.1.1 信号的种类

信号,通常传达与物理系统的状态或特性相关的信息,数学上可以表示为单个或多个变量的函数。例如,语音信号可以表示为自变量为时间的振幅函数,图像信号可以表示为两维空间变量的亮度函数。根据变量是否独立及信号值是连续还是离散,可以将信号分成如下种类(见图 1.1):

- 连续时间信号  $x(t)$ : 定义为时间的连续函数
- 离散时间信号  $x[n] = x(nT)$ : 定义为离散时刻的函数
- 连续幅值(数值)信号  $x_c$ : 幅值上连续
- 离散幅值(数值)信号  $x_d$ : 幅值上离散

这里,括号  $[\ ]$  表示自变量  $n$  只取整数值。时间连续且幅值连续的信号称为模拟信号,而时间离散且幅值离散的信号称为数字信号。将模拟信号转换为数字信号的模数转换器(ADC)通常执行取样保持、量化和编码运算。不过,本书中忽略了量化效应,且“离散时间信号/系统”和“数字信号/系统”混用。

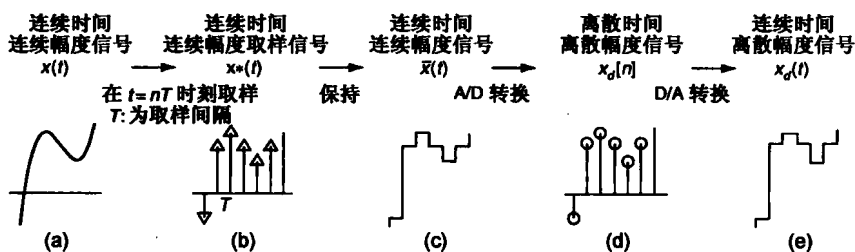


图 1.1 信号的种类

### 1.1.2 连续/离散时间信号

这一节介绍一些基本信号,它们不仅是自然界常见的,而且是构建其他信号的基本单元信号。常用基本连续/离散时间信号如表 1.1 所示(参见图 1.2 和图 1.3)。

表 1.1 常用基本连续/离散时间信号

	函数(连续时间信号)	序列(离散时间信号)
单位阶跃函数/序列	$u_s(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.1.1a)$ <p>例:延迟和标度后的阶跃函数</p> $Au_s(t - t_0) = \begin{cases} A & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases}$	$u_s[n] = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (1.1.1b)$ <p>例:延迟和标度后的阶跃序列</p> $Au_s[n - n_0] = \begin{cases} A & n \geq n_0 \\ 0 & n < n_0 \end{cases}$

(续表)

	函数(连续时间信号)	序列(离散时间信号)
单位冲激函数/序列	$\delta(t) = \frac{d}{dt}u_s(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (1.1.2a)$ 例:延迟和标度后的冲激跃函数 $A\delta(t-t_0) = \begin{cases} A\infty & t = t_0 \\ 0 & t \neq t_0 \end{cases}$ 例: $\delta(t)$ 和 $u_s(t)$ 的关系 $\delta(t) = \frac{d}{dt}u_s(t) \quad (1.1.3a)$ $u_s(t) = \int_{-\infty}^t \delta(\tau)d\tau \quad (1.1.4a)$	$\delta[n] = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (1.1.2b)$ 例:延迟和标度后的冲激序列 $A\delta[n-n_0] = \begin{cases} A & n = n_0 \\ 0 & n \neq n_0 \end{cases}$ 例: $\delta[n]$ 和 $u_s[n]$ 的关系 $\delta[n] = u_s[n] - u_s[n-1] \quad (1.1.3b)$ $u_s[n] = \sum_{m=-\infty}^n \delta[m] \quad (1.1.4b)$
矩形脉冲函数/序列	$r_D(t) = u_s(t) - u_s(t-D)$ $= \begin{cases} 1 & 0 \leq t < D (D: \text{持续时间}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1.1.5a)$	$r_D[n] = u_s[n] - u_s[n-D]$ $= \begin{cases} 1 & 0 \leq n < D (D: \text{持续时间}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1.1.5b)$
单位三角脉冲函数/序列	$\lambda_D(t) = \begin{cases} 1- t-D /D &  t-D  \leq D \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1.1.6a)$	$\lambda_D[n] = \begin{cases} 1- n+1-D /D &  n+1-D  \leq D-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1.1.6b)$
实指数函数/序列	$x(t) = e^{at}u_s(t) = \begin{cases} e^{at} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.1.7a)$	$x[n] = a^n u_s[n] = \begin{cases} a^n & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (1.1.7b)$
实正弦函数/序列	$x(t) = \cos(\omega_1 t + \phi) = \text{Re}\{e^{j(\omega_1 t + \phi)}\}$ $= \frac{1}{2} \{e^{j\phi} e^{j\omega_1 t} + e^{-j\phi} e^{-j\omega_1 t}\} \quad (1.1.8a)$	$x[n] = \cos(\Omega_1 n + \phi) = \text{Re}\{e^{j(\Omega_1 n + \phi)}\}$ $= \frac{1}{2} \{e^{j\phi} e^{j\Omega_1 n} + e^{-j\phi} e^{-j\Omega_1 n}\} \quad (1.1.8b)$
复指数函数/序列	$x(t) = e^{s_1 t} = e^{\sigma_1 t} e^{j\omega_1 t} \quad s_1 = \sigma_1 + j\omega_1 \quad (1.1.9a)$ $\delta_1$ 决定了变化率或时间常数, $\omega_1$ 是振荡频率	$x[n] = z_1^n = r_1^n e^{j\Omega_1 n}, \quad z_1 = r_1 e^{j\Omega_1} \quad (1.1.9b)$ $r_1$ 决定了变化率, $\Omega_1$ 是振荡频率
复正弦函数/序列	$x(t) = e^{j\omega_1 t} = \cos(\omega_1 t) + j \sin(\omega_1 t) \quad (1.1.10a)$	$x[n] = e^{j\Omega_1 n} = \cos(\Omega_1 n) + j \sin(\Omega_1 n) \quad (1.1.10b)$

### 1.1.3 模拟频率和数字频率

一个连续的周期信号 $x(t)$ ,周期为 $P$ , $P$ 通常是满足 $x(t+P) = x(t)$ 的最小的正数。考虑如下的连续周期信号

$$x(t) = e^{j\omega_1 t} \quad (1.1.11)$$

此信号的模拟频率或连续时间频率(角频率)<sup>①</sup>为 $\omega_1$  [rad/s],周期 $P$  [s]为

$$P = \frac{2\pi}{\omega_1} \quad (1.1.12)$$

其中

$$e^{j\omega_1(t+P)} = e^{j\omega_1 t} \quad (\because \omega_1 P = 2\pi \Rightarrow e^{j\omega_1 P} = 1) \quad (1.1.13)$$

① 注意,只要不与赫兹(Hz)为单位的频率混淆,本章将以弧度/秒(用[rad/s]表示)为单位的角频率或弧度频率简称为频率,省略“弧度”或“角度”。

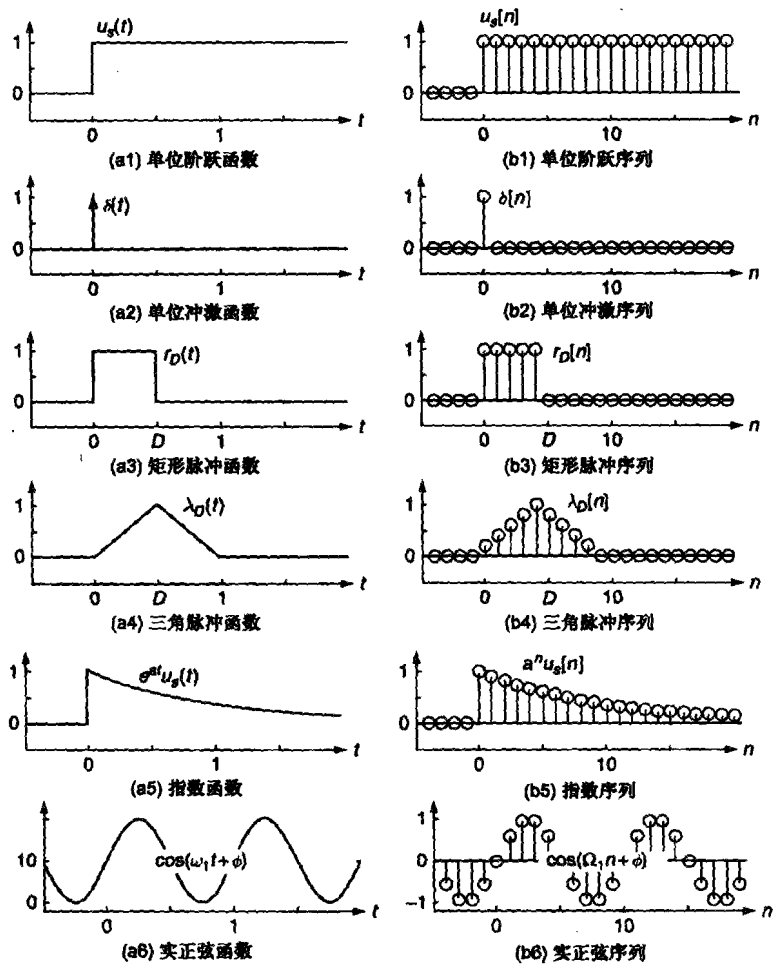


图 1.2 连续时间信号和离散时间信号

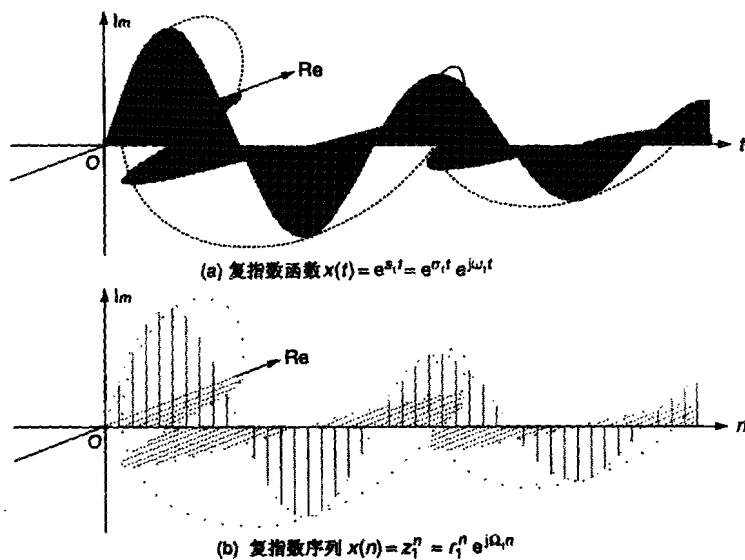


图 1.3 连续/离散时间复指数信号



如果以  $t = nT$  为周期对式(1.1.11)的信号进行取样,可以得到离散时间信号

$$x[n] = e^{j\omega_1 nT} = e^{j\Omega_1 n}, \text{ 式中 } \Omega_1 = \omega_1 T \quad (1.1.14)$$

这个信号是  $n$  的周期信号吗? 你可能认为任意取样间隔  $T$  得到的  $x[n]$  也是周期性的, 因为它是从一个连续周期信号取样获得的。但是, 只有当取样间隔  $T$  是连续信号周期  $P$  的有理数倍数时, 离散时间信号才是周期性的, 这可以通过比较图 1.4(a) 和图 1.4(b) 看出。如果对式(1.1.11)的信号进行取样得到式(1.1.14)的离散时间信号, 取样间隔为  $T = mP/N$  秒/样值(用[s/sample]表示), 这里两个整数  $m$  和  $N$  互为素数, 即二者没有公约数, 此离散时间信号  $x[n]$  才具有周期性, 其数字频率或离散时间频率为

$$\Omega_1 = \omega_1 T = \omega_1 \frac{mP}{N} = \frac{m}{N} 2\pi \quad (1.1.15)$$

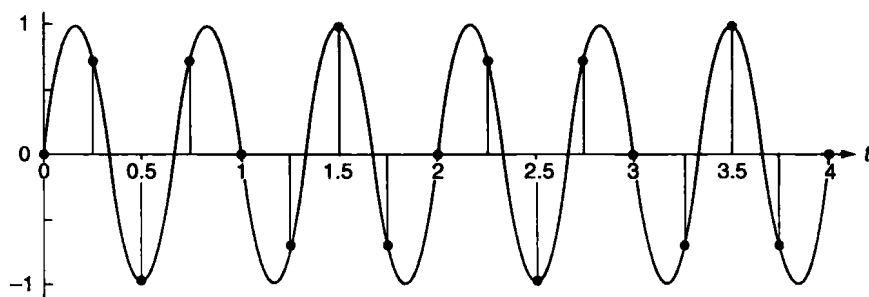
此离散时间周期信号  $x[n]$  的周期为

$$N = \frac{2m\pi}{\Omega_1} \quad (1.1.16)$$

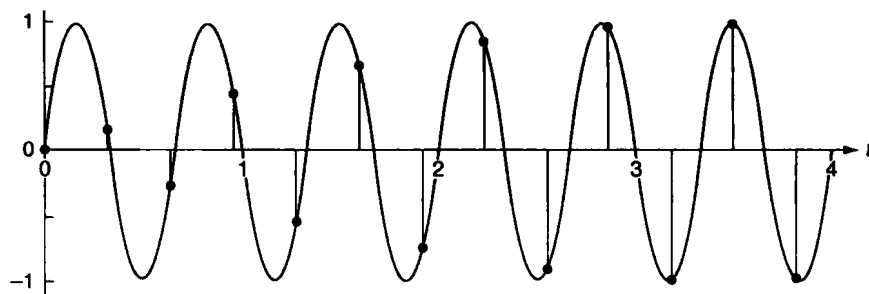
其中

$$e^{j\Omega_1(n+N)} = e^{j\Omega_1 n} e^{j2m\pi} = e^{j\Omega_1 n} \forall n \quad (1.1.17)$$

这是离散时间情况下与式(1.1.12)对应的等式。以下注释中总结了若干观察结果。



(a)以周期  $T=0.25$  对  $x(t)=\sin(3\pi t)$  进行取样



(a)以周期  $T=1/\pi$  对  $x(t)=\sin(3\pi t)$  进行取样

图 1.4 对连续时间周期信号进行取样

#### 注释 1.1 模拟(连续时间)频率和数字(离散时间)频率

(1) 为了使离散时间信号周期为  $N$  ( $N$  为整数), 数字频率  $\Omega_1$  除以  $\pi$  必须为有理数。

(2) 数字频率为  $\Omega_1$  的离散时间信号的周期  $N$  是乘以  $\Omega_1$  的结果为  $2\pi$  的整数倍的最小正整数, 如  $2m\pi$  ( $m$  为整数)。