


北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Signals and Systems:
Processing, Analysis, Practicalities

信号与系统的 处理、分析与实现

张振海 张振山 胡红波 吴日恒 何光 才德 〇 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

信号与系统的处理、 分析与实现

张振海 张振山 胡红波 编著
吴日恒 何光才 德

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统地介绍了信号与系统的基本理论、典型分析与处理方法,以及仿真实现与实验实践等内容,强调理论、实验与应用相结合。全书共分为上、下两篇,上篇为原理篇,重点介绍信号与系统的时域、频域和变换域分析与处理方法,以及 MATLAB 仿真实验实现的内容;分为7章,主要内容包括:测试信号与测试系统基础,连续时间信号与系统的时域分析,离散时间信号与系统的时域分析,连续时间信号与系统的频域分析,离散时间信号与系统的频域分析,连续时间信号与系统的变换域分析,离散时间信号与系统的变换域分析;下篇为实践篇,重点介绍动态测试信号的分析处理、仿真设计与实现,Lab VIEW 与 MATLAB 仿真实现相结合,体现理论与实践相统一的特点。本书在内容上注重经典理论与现代实验相结合,信号与系统的时域、频域、变换域分析处理方法与 MATLAB 仿真实验、Lab VIEW 仿真实现相结合;在目标上强调知识的精熟学习目的;在方法上强调以学生为中心、翻转课堂的学习方法,并紧密结合科研实际,以实例方式展示理论与实践的结合。

本书可作为新工科、机器人、智能无人系统技术、机械工程、仪器科学与技术、兵器科学与技术等相关专业的本科生、研究生从事科学研究、实验数据处理与分析的学习参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统的处理、分析与实现 / 张振海等编著

. -- 北京:北京理工大学出版社,2021.4

ISBN 978-7-5682-9742-4

I. ①信… II. ①张… III. ①信号系统—基本知识

IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 066065 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 26

彩 插 / 3

字 数 / 611 千字

版 次 / 2021 年 4 月第 1 版 2021 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 98.00 元

责任编辑 / 孙 澍

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

作者简介



张振海

张振海，男，1974 年出生，工学博士，博士后，副教授，博士生导师。主要研究兴趣和研究方向为极端高冲击环境实验测试与计量校准，特种军用 MEMS 芯片、超高冲击传感器的基础理论、工程应用与产业化；生物医学微纳操作、微流控芯片与微纳机器人；机器人、无人系统环境感知、障碍物识别与多传感器融合、标定研究，具有多年产品开发经验与背景。作为第一发明人已获授权国防专利 32 项并转化，作为主要起草人制定国家标准 3 项。2018 年 11 月 13 日受邀参加第十五届全国敏感元件与传感器学术会议（STC2018）并做开幕式大会特邀报告。2020 年 11 月 4 日受邀参加 2020 动态计量校准与测试技术学术会议并做开幕式大会特邀报告。编著出版《信息获取技术》《强冲击试验与测试技术》等书。主讲本科专业基础课：信号与系统，传感与动态测试技术。发表学术论文 50 余篇，其中 EI 收录 20 余篇，另有 20 余篇论文发表在 APL、JAP、Nanotechnology、Optics Letters、IEEE T VEH TECHNOL、IEEE T AERO ELEC SYS 等国际著名 SCI 期刊上；主持和参加国家自然科学基金面上、国防基础科研重大和重点项目多项；担任全国振动冲击转速计量技术委员会委员，中国仪器仪表学会传感器分会常务理事，国家自然科学基金重大研究计划、面上项目评审专家，北京市自然科学基金重点、面上项目评审专家，教育部学位与研究生教育学位论文评审专家，中国仪器仪表学会仪表工艺分会理事，仪表元件分会理事，中国微米纳米技术学会理事，国际 SCI 期刊 Measurement Science and Technology、Nanotechnology、APL、JAP、SMS，以及《北京理工大学学报》《航天器环境工程》《计测技术》审稿人。



张振山

张振山，男，1970 年出生，工学博士，高级工程师，北京海泰微纳科技发展有限公司副总经理、新产品研发中心主任；上海优也科技信息有限公司产品总监。四川大学控制科学与工程专业学士、硕士（硕士生导师：游少鹏教授），东北大学控制理论与控制工程专业博士（博士生导师：柴天佑院士），获中国高校科技进步一等奖一项（省部级，排名第二）、辽宁省科技进步一等奖一项（校内排名第二）；具有多年自适应控制、复杂工业过程建模、仿真及优化设定控制等多个重大工程项目经验，以及多年软硬件结合产品、高端仪器仪表、实验装备开发与大项目管理经验，特别是先进控制技术在棒材连轧、板带钢连轧和退火等冶金行业的应用；高端交流励磁电磁流量计产品研发及其在水煤浆、铁矿浆等极端恶劣环境条件的应用；热量表、电磁水表产品研发及在水行业、供热行业的应用；复合微硅压力变送器、加速度传感器研究及应用推广等重大工程背景。出版《信息获取技术》；申请发明专利、实用新型专利 20 余项，发表学术论文多篇，担任中国仪器仪表学会传感器分会理事、仪表元件分会理事、仪表工艺分会理事等学术兼职。



胡红波

胡红波，男，1980 年出生，中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所副研究员，工学硕士，一级注册计量师，国家计量标准一级考评员，主要从事冲击加速度计量技术、基准标准装置研究、建立与测量数据分析处理工作。作为子任务负责人参与完成科技部国家重大科学仪器专项、国家质量监督检验检疫总局质量安全与量值传递专项等科研项目。2018 年获中国计量测试学会科学技术进步奖二等奖（排名第一）。科研团队建立了新一代冲击加速度基准装置，实现冲击加速度范围从 2 万~20 万 g 绝对法校准，并主导了国际上首次低峰值冲击加速度量值关键比对。



吴日恒

吴日恒，男，1973 年出生，烟台大学文经学院主任教授，主要从事阵列信号处理、波形设计、雷通一体化设计、凸优化等。2007 年获得北京理工大学工学博士学位，2007—2008 年在美国田纳西大学进行博士后研究，2008—2011 年在美国 L&P 公司任高级系统工程师，2011—2012 年任职美国 Garmin 公司并担任雷达算法和软件工程师，2012 年任山东航天电子技术研究所任雷达副总工程师，2016 年入职烟台大学文经学院并担任主任教授。2013 年入选烟台市“双百计划”第三层次创新类高层次人才，2018 年获得山东省高等学校科学技术奖三等奖。近三年以第一作者/通讯作者发表 SCI 期刊论文 7 篇，获授权美国、中国发明专利 10 项，主持山东省自然科学基金面上项目 1 项和横向课题 3 项。担任国际著名 SCI 期刊 J-STSP, IEEE Access, TVT, SPL, DSP, IET RSN, ICC 等审稿人。



何光

何光，男，1968 年出生，工学博士，北京理工大学机电学院副教授，主要从事微型霍普金森杆高冲击实验、仿真与优化，MEMS 安保机构设计等科研与教学工作，主持军委装备发展部、国防科工局项目多项，总经费 500 多万元，2018 年获国防科学技术进步奖二等奖 1 项。



才德

才德，男，1973 年出生，北京理工大学机电学院讲师。浙江大学数学系学士、浙江大学光电信息工程系硕士、清华大学精密仪器与机械系博士、中国科学院电子学研究所博士后，主要从事数字信号处理、信号提取与模式识别、软件编程开发科研、教学与实验室管理工作。

本书部分彩图

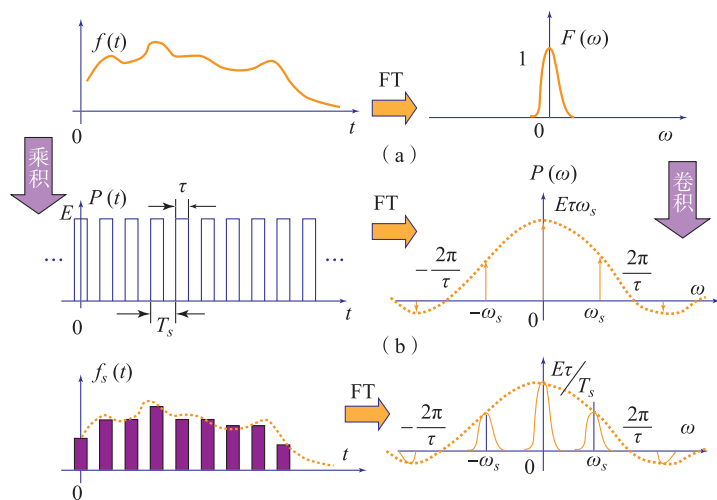


图 5-2 矩形抽样的过程及频谱示意图

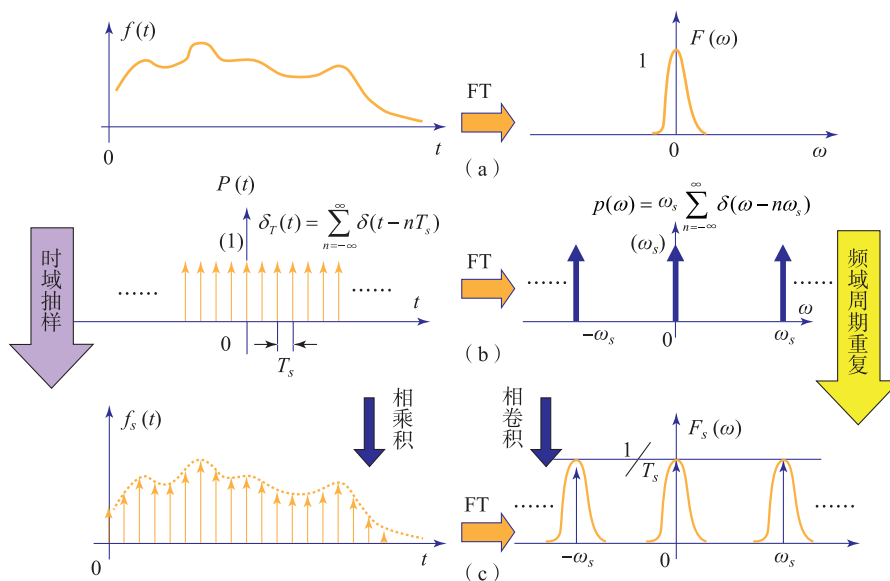


图 5-4 冲激抽样过程及频谱示意图

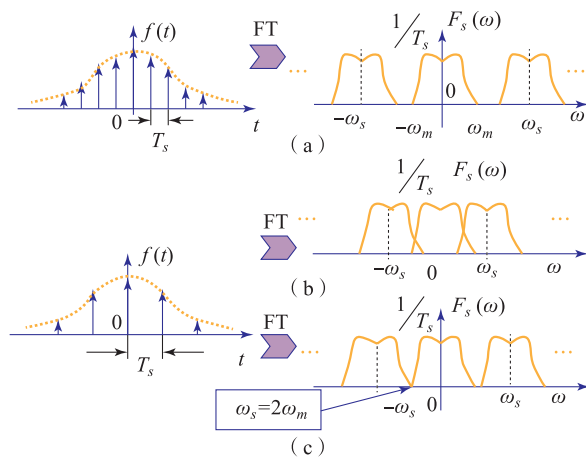


图 5-5 混叠现象示意图

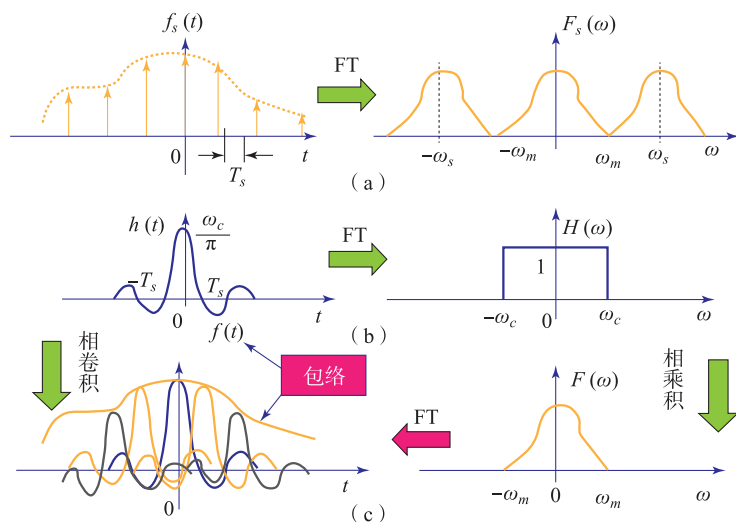


图 5-6 抽样过程及恢复示意图

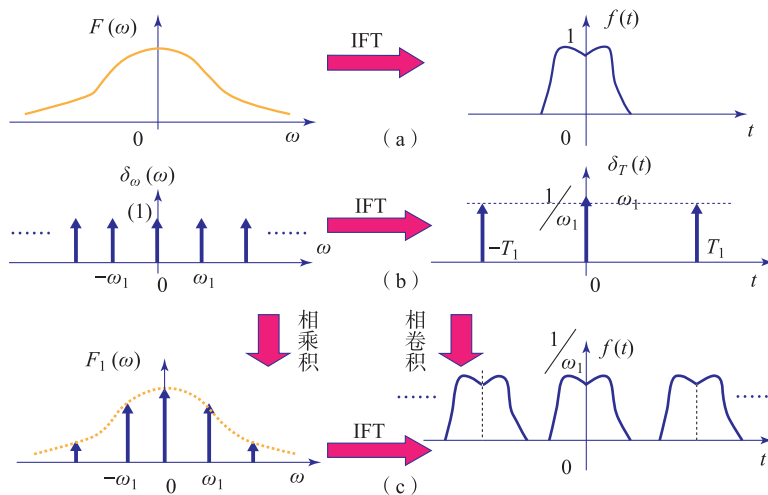


图 5-7 频域抽样过程及频谱示意图

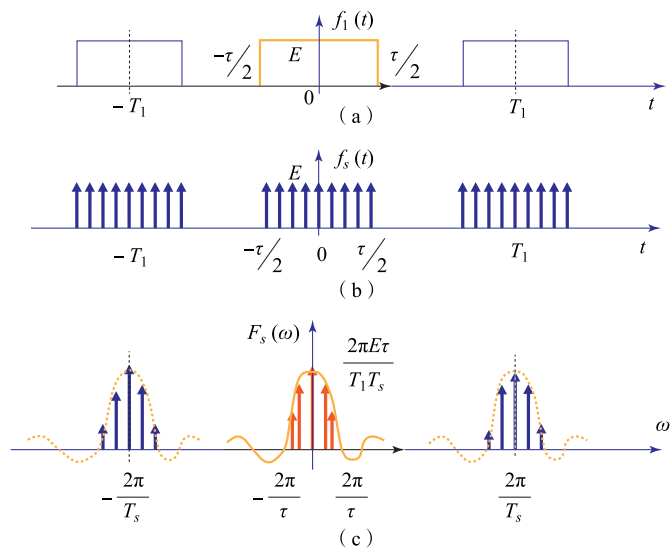


图 5-10 周期方波抽样过程及频谱示意图

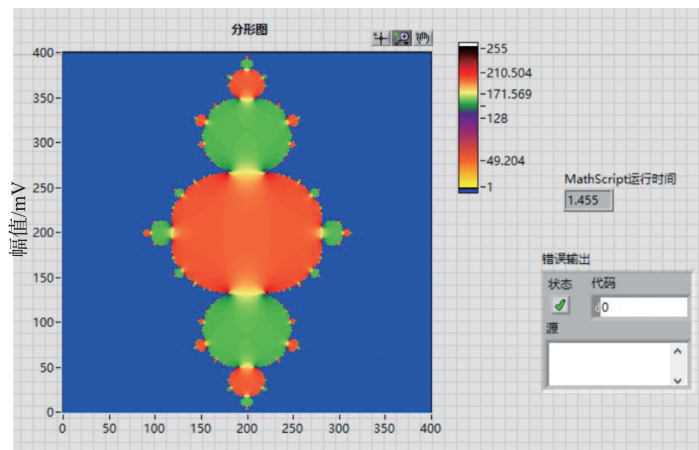


图 8-79 矩阵运算结果

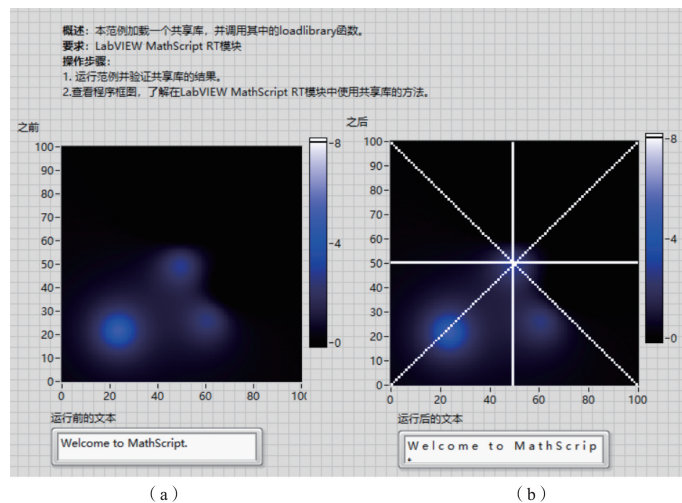


图 8-82 调用共享库前面板

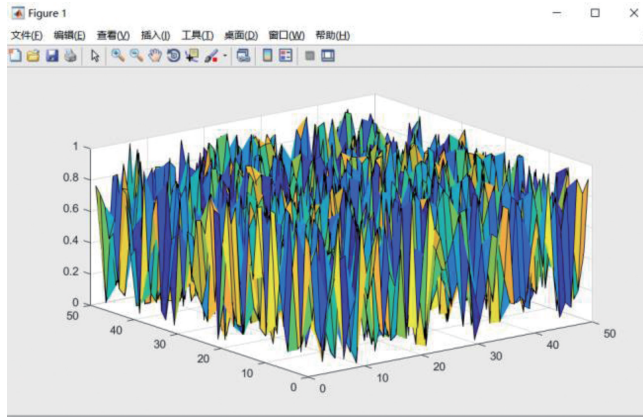


图 8-86 在 Lab VIEW 中运行 MATLAB Script 脚本

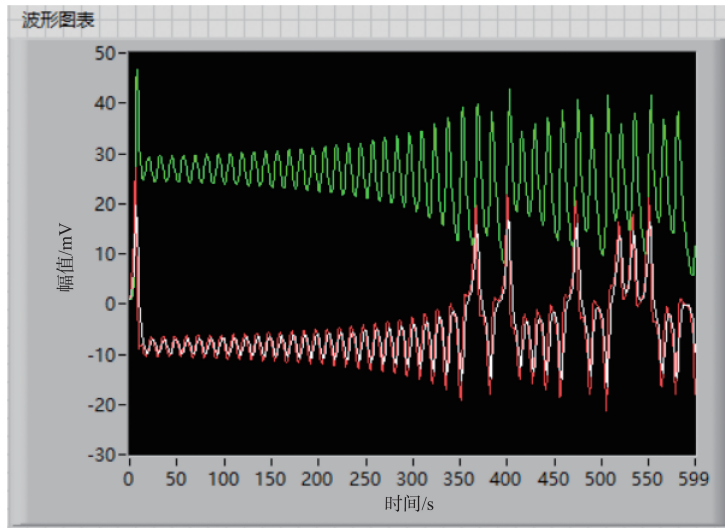


图 8-88 用 MATLAB 脚本节点产生洛伦兹吸引

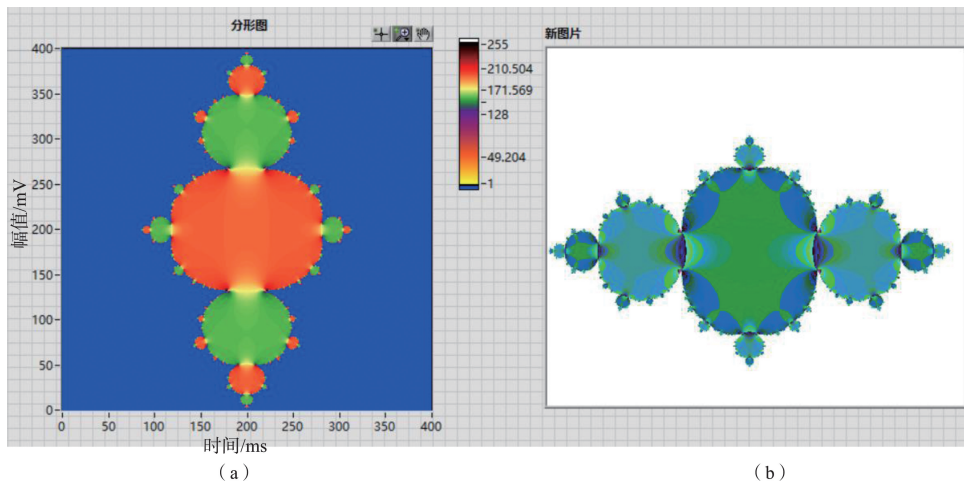


图 8-91 分形图如 8 位像素图

信号获取、数据分析处理及测试系统实现等广泛存在于具有生命现象的自然界之中。在认识自然的过程中，人们不断地获取知识和信息，加深对自然规律的理解，并不断地改造自然。客观世界的信号获取、分析处理及系统实现，极大地促进了科学技术的发展。当今世界已经进入数字化、信息化和智能化时代，其核心之一就是信号获取的数字化及其相关数据的分析处理。信号与系统的处理、分析与实现已经成为现代信息技术领域的基础技术，对社会发展和科技进步起着越来越重要的作用。

信号的获取、数据分析与处理、测试系统实现是现代信息技术领域的基础，在精细化农业、航空航天、深空探测、国防军事、机器人、生物医学工程、大数据及云计算等多个领域得到广泛应用。信号与系统的处理、分析与实现是通过测量手段使人们对事物产生定量的概念，从而发现和掌握事物的规律。

数字化时代的信号获取与分析处理，所获取的数据量惊人，涉及海量数据的管理及基于云服务器的实时信息的处理分析。客观的测试实验系统与环境总有大量非感兴趣的信息存在，因此进行任何测试实验时，人们总是希望获取感兴趣的信号与数据，并尽可能剔除无用数据，这就不可避免地涉及信号的获取、数据分析与处理，测试系统实现问题。下面以我国近年来取得的重大成就，举例说明其中涉及的信号与系统的处理、分析与实现的关键技术。

党的十八大以来，党中央团结带领全党全国各族人民，把脱贫攻坚摆在治国理政的突出位置，8年的持续奋斗，近1亿农村贫困人口脱贫，2020年如期完成了新时代脱贫攻坚目标任务。依靠科技助力农村的扶贫脱贫过程中，精细化农业起了巨大作用，并且有广泛的发展空间和前景。精细化农业实践过程中，需要在较精细的空间尺度上获取、分析、处理农田土壤信息、农田作物苗情信息、作物生长信息、农田作物产量空间分布信息，利用传感器技术采信和获取海量的数据，采用适合的方法对信号进行分析与处理，反馈控制、智能决策并系统实现。

2020年12月17日，“嫦娥”五号探测器带着月球样本稳稳降落，宣告我国首次月面自动采样返回任务取得圆满成功，自2004年立项以来经过17年的不懈努力，为我国探月工程“绕、落、回”三步走发展规划画

上了圆满句号。这其中涉及很多中继卫星的信号传输与通信、月球车月壤采集与飞船返回、空间交汇对接控制等前沿技术。

随着中国科技实力的不断提升，华为公司不仅拿下了 5G 专利榜第一名，在智能手机领域也超越了苹果公司，成为全球第二大手机企业。据统计，华为公司在 2020 年第一季度的 5G 市场份额达 35.7%，以 11.1% 的巨大差距甩开了排名第二的爱立信公司，而诺基亚公司则以 15.8% 的份额位列第三，之后分别是三星公司和中兴通信。华为公司已在智能电网、VR/AR、车联网、远程医疗、智能制造等领域开展了一系列基于网络切片和 MEC 的跨行业合作，极大地促进了 5G 生态繁荣。这其中涉及最新的数字通信技术和数字信号处理，信号与系统理论是基础。

上述实例充分说明：人是认识客观世界和技术实现的主体，信息技术是拓展人的信息功能。人们获取信号信息的目的是对事物客观规律的认识，主要环节包括：获取测试信号，分析与判断测试信号，分类处理信号、运用信号，分析与综合应用与实现。这一过程中获取与采集测试信号的主要目标首先是为了初步掌握概况；分析信号是为了判断与评价信号的相关性和有效性；运用不同的方法处理信号，是为了建立整体的系统的认知结构，掌握信号与系统的相互关系和联系，灵活运用相关知识和规律验证是否正确与有效，进行信号与系统的实现，分析综合得出结论。

本书系统地介绍了信号与系统的基本理论、典型分析与处理方法，以及仿真实验与实验实践等内容，强调理论、应用与实验相结合。本书的撰写工作是基于作者近十多年开设的本科生必修课“信号与系统”及“传感与动态测试技术”等课程，结合作者长期从事信号分析与处理、信息获取技术、传感与测试技术、计量校准技术的基础理论、实验实践的教学、科研、工程应用与产业化方面研究。

本书侧重于信号与系统分析处理方面的基本原理、方法、实验与仿真实验，强调理论、应用与实践的结合。本书从基本原理角度介绍了信号与系统的时域、频域、变换域分析处理方法与 MATLAB 仿真实验、Lab VIEW 仿真实验，目标上强调知识的精熟学习目的，方法上强调以学生为中心、翻转课堂式学习方法，并紧密结合科研实际，以实例方式展示理论与实践的结合。上篇包括：测试信号与测试系统基础，连续时间信号与系统的时域分析，离散时间信号与系统的时域分析，连续时间信号与系统的频域分析，离散时间信号与系统的频域分析，连续时间信号与系统的变换域分析，离散时间信号与系统的变换域分析。MATLAB 在信号分析与处理中具有重要影响，因此每一章都包含 MATLAB 仿真实验环节，让学生尽早认识与熟悉其应用。下篇重点介绍了动态测试信号的分析处理、仿真设计与实现，将传统的基础理论与现代先进的仿真软件相结合，Lab VIEW 虚拟仪器技术在信号处理分析中实践应用有利于学生掌握重要的工程软件。本书在内容选材上注重经典基本理论与方法，实践上与 MATLAB、Lab VIEW 仿真实验相结合，体现理论与实践相结合的特点，兼顾新颖性，

力求对读者有所启迪。

本书结构框架与内容由张振海提出，并主要撰写与统校全书文稿。全书分为上、下两篇，共8章；其中第1、3、7章由张振海、张振山编著；第4、5章由张振海、胡红波、张振山编著；第2章由张振海、吴日恒、才德编著；第6章由张振海、何光、吴日恒编著；第8章由张振海、张振山、陈娅琼、许朝阳编著。

本书引用了许多专家学者的教材、著作与论文，在此表示感谢。书中引用的部分参考资料包括：《信号分析与处理》《信号与系统》《信息获取技术》《精通 Lab VIEW 信号处理》《测量电子电路设计——滤波器篇》《工程振动测试技术》《现代调制解调技术》《信号与线性系统分析》《新编传感器技术手册》《数字信号处理》《测试信号分析与处理》《Lab VIEW》《MATLAB 及其混合编程技术》《Lab VIEW 数据采集与仪器控制》等，以及多位硕士生和博士生的学位论文，博士生腾飞、张文一和硕士生许朝阳、韩季洲、刘明等参与了部分插图和公式的编辑处理工作，作者在此表示衷心的感谢！

信号与系统的处理、分析与实现涉及的知识点多，信息量大，由于编著者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请专家和广大读者批评指正。

作者的电子邮箱为 zhzhang@bit.edu.cn；本书配套教学课件 PPT 资料请登录北京理工大学出版社网站 <http://www.bitpress.com.cn/book/book.de.tail> 注册下载。

编著者
2021年4月

目 录

CONTENTS

上篇：原理篇 信号与系统的基本理论与分析方法

第 1 章 测试信号与测试系统基础	003
1.1 引言	003
1.1.1 信号与系统概述	003
1.1.2 信号的处理与分析概述	004
1.2 信号的分类	006
1.2.1 确定性信号与随机信号	006
1.2.2 连续信号与离散信号	007
1.2.3 能量信号与功率信号	007
1.2.4 周期信号与非周期信号	008
1.3 系统的定义、分类与互联	009
1.3.1 系统的定义与描述	009
1.3.2 系统的特性与分类	010
1.3.3 系统的互联	013
1.4 测试信号的变换与调理	016
1.4.1 电桥电路与测试信号放大电路	016
1.4.2 频率/电压变换器	022
1.4.3 模/数 (A/D) 转换器	022
1.4.4 调制与解调	025
1.4.5 滤波器	028
1.5 测试系统的分析与选用	036
1.5.1 测试系统的动态特性	036
1.5.2 研究与分析测试系统动态特性的方法	036

1.5.3	提高与改善测试系统性能指标的途径	037
1.5.4	典型工程测试系统的分析	037
1.5.5	测试系统的工程应用实例	040
1.5.6	工程测试系统的选用原则	042
1.6	本书知识框架结构	045
1.7	本书学习方法	047
第2章	连续时间信号与系统的时域分析 单位冲激响应	049
2.1	引言	049
2.2	基本连续时间信号	049
2.2.1	单位阶跃函数	049
2.2.2	单位冲激函数	051
2.2.3	复指数信号	055
2.3	连续时间信号的时域运算	058
2.3.1	信号的基本运算	058
2.3.2	信号的卷积积分	062
2.4	LTI 连续时间系统的微分方程及其求解	069
2.4.1	LTI 连续时间系统的微分方程	069
2.4.2	微分方程的求解	070
2.4.3	关于 0_- 与 0_+ 值	072
2.5	零输入响应与零状态响应	073
2.5.1	零输入响应的求解	073
2.5.2	零状态响应的求解	073
2.6	单位冲激响应	075
2.7	用单位冲激响应表征系统的性质	077
2.8	系统的结构及其模拟图	080
2.9	MATLAB 仿真设计与实现	084
	本章习题及部分答案要点	086
第3章	离散时间信号与系统的时域分析 单位抽样响应	089
3.1	引言	089
3.2	基本离散时间信号	089
3.2.1	单位阶跃序列和单位抽样序列	089
3.2.2	复指数序列	091
3.2.3	由连续时间信号抽样得到的离散时间序列	094
3.3	离散时间信号的时域运算	095
3.3.1	信号的基本运算	095
3.3.2	信号的卷积和	098
3.4	LTI 离散时间系统的差分方程及其求解	101

3.4.1	LTI 离散时间系统的差分方程	101
3.4.2	差分方程的求解	102
3.5	零输入响应与零状态响应	104
3.5.1	零输入响应的求解	104
3.5.2	零状态响应的求解	105
3.5.3	全响应的求解	105
3.6	单位抽样响应	106
3.6.1	单位抽样响应的定义及求解	107
3.6.2	用单位抽样响应表征系统的性质	110
3.6.3	利用卷积和求解零状态响应	112
3.7	卷积和、反卷积的求解方法	114
3.8	系统的结构及其模拟图	118
3.9	MATLAB 仿真设计与实现	121
	本章习题及部分答案要点	123
第 4 章	连续时间信号与系统的频域分析 连续时间傅里叶变换	126
4.1	引言	126
4.2	正交分解与正交性	126
4.2.1	信号的正交分解	126
4.2.2	正交函数与正交函数集	127
4.2.3	复指数函数是正交函数	128
4.3	周期信号的频谱分析 连续时间傅里叶级数	129
4.3.1	周期信号的傅里叶级数	129
4.3.2	周期信号的频谱图	134
4.4	非周期信号的频谱分析 连续时间傅里叶变换	138
4.4.1	非周期信号的傅里叶变换	138
4.4.2	周期信号的傅里叶变换	144
4.5	卷积定理及其应用	146
4.5.1	时域卷积定理	146
4.5.2	频域卷积定理	147
4.6	连续时间傅里叶变换的性质与应用	150
4.7	LTI 连续时间系统的频域分析与频率响应	165
4.7.1	频率响应的概念	165
4.7.2	频率响应的求解	166
4.7.3	利用频率响应求解零状态响应	167
4.8	信号无失真传输 波特图 滤波与滤波器	168
4.8.1	无失真传输条件	168
4.8.2	波特图	169
4.8.3	滤波与理想滤波器	176

4.9 系统的结构及其模拟图	181
4.10 MATLAB 仿真设计与实现	184
本章习题及部分答案要点	189
第 5 章 离散时间信号与系统的频域分析 离散时间傅里叶变换	198
5.1 引言	198
5.2 抽样定理	198
5.2.1 基本概念	198
5.2.2 抽样信号的频谱	199
5.2.3 时域抽样定理	201
5.2.4 频域抽样定理	202
5.3 周期序列的频谱分析 离散时间傅里叶级数	204
5.3.1 用复指数序列表示周期的离散时间信号	204
5.3.2 离散傅里叶系数的确定	206
5.4 非周期序列的频谱分析 离散时间傅里叶变换	208
5.4.1 非周期序列的表示	208
5.4.2 离散时间傅里叶变换的收敛性	210
5.4.3 离散时间与连续时间傅里叶变换的差异	210
5.4.4 离散时间傅里叶变换的求解	211
5.5 离散时间傅里叶变换的性质	214
5.6 利用频率响应求解零状态响应	220
5.7 有限长序列的离散时间傅里叶变换	221
5.7.1 从离散时间傅里叶级数到离散时间傅里叶变换	221
5.7.2 离散傅里叶变换与离散时间傅里叶变换的关系	223
5.8 快速傅里叶变换	224
5.8.1 快速傅里叶变换的基本思路	224
5.8.2 Cooley - Tukey 快速傅里叶变换算法	227
5.9 系统的结构及其模拟图	232
5.10 MATLAB 仿真设计与实现	234
本章习题及部分答案要点	242
第 6 章 连续时间信号与系统的变换域分析 拉普拉斯变换	249
6.1 引言	249
6.2 拉普拉斯变换	249
6.2.1 从傅里叶变换到拉普拉斯变换	249
6.2.2 拉普拉斯变换	250
6.2.3 拉普拉斯变换的收敛域	251
6.2.4 拉普拉斯变换与连续时间傅里叶变换的关系	253
6.3 初值定理与终值定理	254

6.4	拉普拉斯变换性质与常用拉普拉斯变换对	255
6.5	拉普拉斯反变换的求解	260
6.5.1	利用拉普拉斯变换的性质求解	261
6.5.2	利用部分分式展开法求解	261
6.6	LTI 连续时间系统的变换域 (s 域) 分析	263
6.6.1	微分方程的 s 域分析	263
6.6.2	电路系统的 s 域分析	264
6.7	系统函数的变换域分析	271
6.7.1	系统函数	271
6.7.2	系统的因果性与稳定性分析	273
6.7.3	系统的稳定性罗斯—霍尔维茨判据	275
6.8	系统的结构及其模拟图	278
6.9	MATLAB 仿真设计与实现	282
	本章习题及部分答案要点	286
第 7 章	离散时间信号与系统的变换域分析 z 变换	293
7.1	引言	293
7.2	离散时间序列的 z 变换	293
7.2.1	z 变换及其收敛域	293
7.2.2	z 变换与离散时间傅里叶变换的关系	298
7.3	初值定理与终值定理	298
7.3.1	初值定理	298
7.3.2	终值定理	299
7.4	z 变换的性质与常用序列 z 变换表	301
7.5	z 反变换的求解	306
7.5.1	幂级数展开法 (长除法)	307
7.5.2	部分分式展开法	307
7.6	LTI 离散时间系统的变换域 (z 域) 分析	309
7.6.1	零输入响应的求解	309
7.6.2	零状态响应的求解	310
7.6.3	系统全响应的求解	311
7.7	系统函数的 z 域分析	313
7.7.1	系统函数	314
7.7.2	系统的稳定性和因果性分析	317
7.8	z 变换与拉普拉斯变换的关系	318
7.9	系统的结构及其模拟图	321
7.10	MATLAB 仿真设计与实现	324
	本章习题及部分答案要点	326