

Modern Signal Processing

Second Edition

现代信号处理 (第二版)

张贤达 著

Zhang Xianda



768

768

新编《信息、控制与系统》系列教材

现代信号处理

(第二版)

MODERN SIGNAL PROCESSING

Second Edition

张贤达 著

清华大学出版社

Springer

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了现代信号处理的主要理论、具有代表性的方法及一些典型应用。全书共 7 章, 内容包括随机信号、参数估计理论、现代谱估计、自适应滤波、高阶信号分析、时频信号分析的线性变换与非线性变换方法。本书取材广泛, 内容新颖, 充分反映了信号处理的新理论、新技术、新方法和新应用, 可以帮助读者尽快跟踪信号处理的最新国际发展。与第一版相比, 本书的讲解与阐述更容易理解与自学, 更注重理论与应用的结合。

本书为清华大学研究生精品课计划教材, 是一本与国际前沿科学接轨的研究生教学参考书, 可供电子、通信、自动化、计算机、物理、生物医学和机械工程等各学科有关教师、研究生和科技人员教学、自学或进修之用。

图书在版编目(CIP)数据

现代信号处理/张贤达著. —2 版. —北京:清华大学出版社, 2002
(新编信息、控制与系统系列教材)

ISBN 7-302-06003-7

I. 现… II. 张… III. 信号处理-教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 081656 号

版权所有, 翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签, 无标签者不得销售。

出版者: 清华大学出版社 (北京清华大学学研大厦, 邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京昌平环球印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 **印张:** 34.5 **字数:** 669 千字

版 次: 2002 年 10 月第 2 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06003-7/TN·131

印 数: 0001 ~ 5000

定 价: 38.00 元

第二版前言

最近十年, 信号处理学科经历了巨大的变化, 是信息科学中发展最迅速的学科之一。尤其是伴随无线通信的急速发展, 信号处理更是获得了极大的推动, 诞生了通信信号处理这一新的学科领域。现在, 信号处理已在各个科学与技术领域获得了极为广泛的应用。可以这样说, 学习现代信号处理的理论、方法与应用已成为通信、电子、自动化、生物医学、机械工程等众多学科或专业的研究生与科技人员的迫切需要。

《现代信号处理》(第一版) 于 1995 年出版以来, 已先后印刷了 6 次, 共 18000 册。承蒙广大读者厚爱, 在多所大学里被用作研究生教材或参考书; 至目前, 在 SCI 收录的国际杂志上被他人 9 篇论文引用, 在中文学术期刊上被他人 400 余篇论文引用。为了适应信号处理的新发展, 我们对《现代信号处理》一书进行了重大修改:

- (1) 将原书的 12 章压缩为 7 章;
- (2) 介绍了一些近几年的信号处理新方法;
- (3) 增加了大量的应用举例;
- (4) 重新编排了全部习题, 扩大了习题的范围, 丰富了习题的内容。

全书内容分为基础(第 1 章、第 2 章)、现代谱估计(第 3 章)、自适应信号处理(第 4 章)、高阶统计分析(第 5 章)和时频信号分析(第 6 章、第 7 章)共 5 部分。前 5 章可在 48 学时内讲授完, 全书则需要 64 学时的教学计划。为了方便读者参考, 还配套编写了《现代信号处理习题与解答》一书。

笔者曾在清华大学、西安电子科技大学、空军工程大学、桂林电子工业学院讲授过本书。根据本人的教学体会, 读者只要把握好本书基本内容的学习、多做一些习题、完成好书中的 2~3 次计算机仿真实验, 就能够比较快地与信号处理的最新国际发展“接轨”, 将信号处理的典型方法和新技术在学位论文的研究中加以灵活的应用, 收到学以致用效果。

“现代信号处理”已被列为清华大学研究生精品课计划。本书就是在该计划的资助下完成的。书中反映了作者在清华大学和西安电子科技大学的一系列研究成果。这些研究得到了国家自然科学基金、教育部高等学校博士点专项基金、教育部“长江学者奖励计划”等的资助, 也是与很多合作者的联合研究成果。在此, 向这些合作研究者表示衷心的感谢。

在本书的改写中, 采纳了我的十几位博士、硕士研究生和其他很多听课研究生的意见和建议。这些意见和建议对于改进本书的可读性和易懂性, 起到了重要的作

用。

感谢博士研究生丁建江、杨恒、高秋彬、吕齐和硕士研究生苏泳涛、彭春翌，他们仔细阅读和校对了书稿，提出了一些很好的改进意见，并帮助制作了书中的一些插图。

虽然作者努力而为，但本书仍然可能存在一些不足之处，甚至某些误笔。在此，诚恳欢迎和盼望各位学术先辈、同仁和读者诸君的批评与指正意见！

张贤达

2002年8月31日谨识于清华园

第一版前言

信号与信息处理学科是信息科学的重要组成部分,该学科水平的高低反映一个国家的整体科技水平。

近年来,信号处理的理论与方法获得了迅速发展。几年前,被研究的对象还限于较简单的线性、因果最小相位系统,而现在,非线性、非因果、非最小相位系统已成为研究的热点。同时,由于数学工具——高阶统计量和小波变换的新发展,现在已能分别对非高斯信号和非平稳(即时变)信号进行有效的分析与处理。几年前尚认为难于解决的加性有色噪声中的信号处理,也已取得实质性的突破。此外,高分辨谱分析和自适应信号处理也更加完善。这些新发展的理论与技术成为现代信号处理的主要标志。现代信号处理已经广泛应用于雷达、声纳、通信、自动化、地球物理、航空航天、生物医学、天文、振动工程等几乎所有技术领域。

鉴于信号处理学科的迅猛发展与广泛应用,广大科技工作者和硕士、博士研究生迫切要求学习与掌握信号处理的现代理论与技术。国内已出版的数字信号处理方面的书籍尚不能适应现代信号处理迅速发展的需求。本书旨在填补这一空白,力求全面、系统而深入地介绍信号处理的主要新理论和新技术,使广大读者尽快跟踪现代信号处理的最新发展趋势与热门的研究方向。作者希望本书可用作硕士、博士研究生教材或参考书,而且其内容的广度和深度也能适于广大科技工作者自学和进修。为此,在选材上,作者刻意于内容的广泛性、新颖性和先进性;在对理论和方法地论述上,侧重于阐明基本思想,而又尽量兼顾推导证明的易读性和数学的严密性;为方便读者在工程技术和科研中直接应用本书介绍的大量国际先进研究成果,书中以具体算法的形式对这些重要成果加以归纳和总结。

全书共十二章,内容大致分为四个部分:统计信号处理(第一至第七章),多维和多信道信号处理(第八、九章),非高斯信号处理(第十章)和非平稳信号分析(第十一、第十二章)。

前七章构成统计信号处理的一个体系,依次讲述参数估计理论、信号检测、波形估计、现代谱分析、自适应滤波、鲁棒参数估计与谱分析、统计性能分析。这一部分仅以较少篇幅阐述统计信号处理的基本理论和方法,而侧重于介绍统计信号处理近几年的新成果和新发展。主要讨论了透视匹配滤波器和透视功率检测器(第二章),新息过程及其在维纳、卡尔曼滤波中的应用(第三章),奇异值分解、总体最小二乘和广义特征值分解在参数估计和谱分析中的应用(第四章)。第五章通过引入向量空间分析这一十分有效的方法,为读者提供分析多种自适应滤波器的一种通用的

数学工具。

为使鲁棒参数估计与谱分析构成一个比较完整的新体系,第六章将鲁棒统计学与各种鲁棒方法有机的组织在一起。

第七章尝试从工程角度介绍在数学专业课程中讲授的数理统计的逼近定理(几乎肯定收敛、渐进正态和几乎肯定收敛速率等),并以白噪声中的 AR 谱估计值的统计性能分析为例,为读者提供今后在对新方法或新算法进行统计性能评价时非常有用的基本理论与方法。

第二部分介绍了多维和多信道信号处理领域中出现的许多新进展。第八章讨论了二维信号处理问题的特点和难点(稳定性、谱因子分解、模型参数的非唯一可识别性、二维最大熵法尚无闭式解),重点介绍高分辨率二维 ARMA 谱估计与谐波恢复、二维最大熵法和二维 LMS 自适应滤波等新方法。第九章提供多信道信号处理的理论框架,阐述多变元 AR 和 ARMA 过程的建模,以及多信道格型自适应滤波器等。

非高斯信号处理是近几年才发展起来的新技术。第十章介绍其主要理论、方法及应用,重点讨论了如何使用高阶统计量解决非因果非最小相位系统辨识、高斯有色噪声抑制以及高斯/非高斯有色噪声下的信号检测和谐波恢复等几个重要问题。

非平稳(即时变)信号的分析是现代信号处理中近几年新兴的又一重要领域。第十一章侧重时频分析,阐述各种时频表示的数学性质及关系、Wigner-Ville 分布的实现与应用。第十二章为小波分析。与通常从数学角度介绍小波分析的方法不同,本章主要从信号处理的角度出发,系统介绍小波分析中最具代表性的理论——正交基、框架、多分辨率分析和滤波器组。特别地,从 FIR、IIR 和时域三种滤波器组理论出发,对小波分析做了详细的论述。

根据教学时数和内容侧重点的不同,适当地将本书有关章节加以增删和组合,本书又可用作其他课程(如时间序列分析、现代谱估计、自适应信号处理等)的教材或参考书。为便于教学和自学,本书选编了一定数量的习题。希望有条件的读者能够选做一些习题中要求的计算机仿真实验,这是加深理解和掌握有关重要方法的最有效的途径。

本书是笔者在现代信号处理领域近十年研究成果和教学工作的一步总结性著作。全书介绍的大部分内容是近几年国际著名刊物上发表的论文成果,其中包括作者本人在国际权威杂志——IEEE 信号处理、自动控制和信息论三家汇刊上发表的十几篇论文。

由于现代信号处理正在蓬勃发展之中,加之篇幅有限,本书的选材与介绍一定会有遗漏与不足之处。拙笔未能如愿,甚至不妥之处亦在所难免。诚恳希望诸位专家、同仁和广大读者批评指正。

作者在教学和科研工作中得到了中科院院士李衍达教授的热情关心、支持与帮

助，中科院院士保铮教授对本书的出版给予了极大的关注和支持，在此谨向他们致以最诚挚的鸣谢。胡东成教授帮助本书得以早日问世。唐晓英同志为本书作出了大量具体的帮助工作，在此，一并表示衷心的感谢。

作者在本书中述及的有关研究工作得到国家自然科学基金等的资助。

张贤达

1994 年 7 月于清华大学

目 录

✓

第 1 章 随机信号	1
1.1 信号分类	1
1.2 相关函数、协方差函数与功率谱密度	7
1.2.1 自相关函数、自协方差函数与功率谱密度	7
1.2.2 互相关函数、互协方差函数与互功率谱密度	12
1.3 两个随机信号的比较与识别	15
1.3.1 独立、不相关与正交	15
1.3.2 多项式序列的 Gram-Schmidt 标准正交化	19
1.4 信号变换	20
1.4.1 信号变换的分类	20
1.4.2 非正交基函数的转换	23
1.5 具有随机输入的线性系统	26
1.5.1 系统输出的功率谱密度	26
1.5.2 窄带通滤波器	29
本章小结	32
习题	32
第 2 章 参数估计理论	37
2.1 估计子的性能	37
2.1.1 无偏估计与渐近无偏估计	38
2.1.2 估计子的有效性	40
2.2 Fisher 信息与 Cramer-Rao 不等式	42
2.3 Bayes 估计	45
2.4 最大似然估计	49
2.5 线性均方估计	54
2.6 最小二乘估计	56
2.6.1 最小二乘估计及其性能	56
2.6.2 加权最小二乘估计	58

本章小结	60
习题	60
第 3 章 现代谱估计	65
3.1 离散随机过程与非参数化谱估计	65
3.1.1 离散随机过程	66
3.1.2 非参数化功率谱估计	67
3.2 平稳 ARMA 过程	69
3.3 平稳 ARMA 过程的功率谱密度	74
3.3.1 ARMA 过程的功率谱密度	75
3.3.2 功率谱等价	80
3.4 ARMA 谱估计	83
3.4.1 ARMA 功率谱估计的两种线性方法	84
3.4.2 修正 Yule-Walker 方程	86
3.4.3 AR 阶数确定的奇异值分解方法	90
3.4.4 AR 参数估计的总体最小二乘法	93
3.5 ARMA 模型辨识	96
3.5.1 MA 阶数确定	97
3.5.2 MA 参数估计	100
3.6 最大熵谱估计	102
3.6.1 Burg 最大熵谱估计	102
3.6.2 Levinson 递推	105
3.6.3 Burg 算法	111
3.6.4 Burg 最大熵谱分析与 ARMA 谱估计	112
3.7 Pisarenko 谐波分解法	115
3.7.1 Pisarenko 谐波分解	115
3.7.2 谐波恢复的 ARMA 建模法	118
3.8 扩展 Prony 方法	119
3.9 多重信号分类 (MUSIC)	126
3.9.1 波束形成器	126
3.9.2 信号子空间与噪声子空间	130
3.9.3 MUSIC 方法	133
3.9.4 解相干 MUSIC 方法	135
3.9.5 求根 MUSIC 方法	137

3.10 旋转不变技术 (ESPRIT).....	138
3.10.1 基本 ESPRIT 方法	138
3.10.2 TLS-ESPRIT 方法	142
3.10.3 ESPRIT 方法的另一形式	143
3.11 酉 ESPRIT	147
本章小结	151
习题	151
 第 4 章 自适应滤波器	157
4.1 匹配滤波器	157
4.1.1 匹配滤波器的定义	158
4.1.2 匹配滤波器的性质	163
4.1.3 匹配滤波器的实现	165
4.2 连续时间的 Wiener 滤波器	166
4.3 最优滤波理论与 Wiener 滤波器	171
4.3.1 线性最优滤波器	171
4.3.2 正交性原理	172
4.3.3 Wiener 滤波器	174
4.4 Kalman 滤波	177
4.4.1 Kalman 滤波问题	177
4.4.2 新息过程	178
4.4.3 Kalman 滤波算法	180
4.4.4 基于 Kalman 滤波的角速度估计	184
4.5 LMS 类自适应算法	188
4.5.1 LMS 算法及其基本变型	190
4.5.2 解相关 LMS 算法	192
4.5.3 学习速率参数的选择	195
4.5.4 LMS 算法的统计性能分析	200
4.5.5 LMS 算法的跟踪性能	203
4.6 RLS 自适应算法	206
4.6.1 RLS 算法	206
4.6.2 RLS 算法与 Kalman 滤波算法的比较	209
4.6.3 RLS 算法的统计性能分析	211
4.6.4 快速 RLS 算法	213

4.7 LMS 自适应格型滤波器	215
4.7.1 对称的格型结构	215
4.7.2 格型滤波器设计准则	218
4.7.3 格型自适应算法	221
4.8 自适应滤波器的算子理论	223
4.8.1 滤波器算子的基本要求	224
4.8.2 投影矩阵与正交投影矩阵	225
4.8.3 前、后向预测滤波器	227
4.8.4 投影矩阵和正交投影矩阵的更新	230
4.9 LS 自适应格型滤波器	232
4.10 自适应谱线增强器与陷波器	237
4.10.1 谱线增强器与陷波器的传递函数	238
4.10.2 基于 IIR 格型滤波器的自适应陷波器	239
4.11 广义旁瓣对消器	242
4.12 盲自适应多用户检测	245
4.12.1 盲多用户检测的典范表示	245
4.12.2 盲多用户检测的 LMS 和 RLS 算法	246
4.12.3 盲多用户检测的 Kalman 自适应算法	249
4.12.4 实验结果	252
本章小结	255
习题	256
 第 5 章 高阶统计分析.....	 263
5.1 矩与累积量	263
5.1.1 高阶矩与高阶累积量的定义	263
5.1.2 高斯信号的高阶矩与高阶累积量	266
5.1.3 矩与累积量的转换关系	267
5.2 矩与累积量的性质	269
5.3 高阶谱	274
5.3.1 高阶矩谱与高阶累积量谱	274
5.3.2 双谱估计	278
5.4 非高斯信号与线性系统	281
5.4.1 亚高斯和超高斯信号	281
5.4.2 非高斯信号通过线性系统	282

5.5 FIR 系统辨识	286
5.5.1 RC 算法	286
5.5.2 累积量算法	291
5.5.3 MA 阶数确定	295
5.6 因果 ARMA 模型的辨识	296
5.6.1 AR 参数的辨识	296
5.6.2 MA 阶数确定	302
5.6.3 MA 参数估计	304
5.7 有色噪声中的谐波恢复	309
5.7.1 复信号的累积量定义	309
5.7.2 谐波过程的累积量	311
5.7.3 高斯有色噪声中的谐波恢复	313
5.7.4 非高斯有色噪声中的谐波恢复	314
5.8 自适应滤波	322
5.8.1 基于累积量的 MMSE 准则	322
5.8.2 RLS 自适应算法	324
5.8.3 超定的辅助变量自适应算法	325
5.9 时延估计	328
5.9.1 广义互相关方法	329
5.9.2 高阶统计量方法	330
5.10 双谱在信号分类中的应用	335
5.10.1 积分双谱	336
5.10.2 选择双谱	339
5.10.3 实验结果	341
本章小结	343
习题	344
 第 6 章 时频信号分析——线性变换	349
6.1 信号的局部变换	349
6.2 解析信号与瞬时物理量	353
6.2.1 解析信号	353
6.2.2 基带信号	357
6.2.3 瞬时频率与群延迟	358
6.2.4 不相容原理	360

6.3 短时 Fourier 变换	362
6.3.1 连续短时 Fourier 变换	363
6.3.2 离散短时 Fourier 变换	366
6.4 Gabor 变换	368
6.4.1 连续 Gabor 变换	368
6.4.2 离散 Gabor 变换	375
6.5 小波变换	378
6.5.1 小波的物理考虑	379
6.5.2 连续小波变换	381
6.5.3 连续小波变换的离散化	384
6.6 小波分析与框架理论	386
6.6.1 小波分析	386
6.6.2 框架理论	390
6.7 多分辨分析	395
6.8 正交滤波器组	399
6.8.1 正交多分辨分析	399
6.8.2 正交滤波器组设计	402
6.8.3 快速正交小波变换	412
6.9 双正交滤波器组	416
6.9.1 双正交多分辨分析	416
6.9.2 双正交滤波器组设计	420
6.9.3 双正交小波设计	422
6.9.4 快速双正交小波变换	428
6.10 Gabor 原子网络及其在雷达目标识别中的应用	432
6.10.1 Gabor 变换册	432
6.10.2 信号分类的 Gabor 原子神经网络	434
6.10.3 实验结果	439
本章小结	442
习题	443

第 7 章 时频信号分析——非线性变换

447

7.1 时频分布的一般理论	447
7.1.1 时频分布的定义	448
7.1.2 时频分布的基本性质要求	449

7.2 Wigner-Ville 分布	451
7.2.1 数学性质	451
7.2.2 与演变谱的关系	454
7.2.3 基于 Wigner-Ville 分布的信号重构	456
7.3 模糊函数	458
7.4 Cohen 类时频分布	464
7.4.1 定义	465
7.4.2 对核函数的要求	467
7.5 时频分布的性能评价与改进	470
7.5.1 时频聚集性	471
7.5.2 交叉项抑制	472
7.5.3 其他几种典型时频分布	476
7.5.4 核函数的优化设计	483
7.6 非线性调频信号的时频分析	486
7.6.1 多项式调频信号	486
7.6.2 高阶时频分布	487
本章小结	492
习题	492
 附录 A Hilbert 空间.....	495
 附录 B Cauchy-Schwartz 不等式.....	499
 附录 C 相对于复向量的导数	501
 参考文献	505
 索引	519

第 1 章 随 机 信 号

信号是信息的载体。信号的信息可以是一系统 (如物理系统、人体) 的模型参数、冲激响应和功率谱, 也可以是一人工目标 (如飞机、舰船) 的分类特征, 还可以是诸如气象、水文的预报、人体心电的异常等等。其数值或观测值为随机变量的信号称为随机信号。所谓随机, 是指信号的取值服从某种概率规律。这一规律可以是完全已知的、部分已知的或完全未知的。随机信号也称随机过程、随机函数或随机序列。本章将侧重平稳随机信号的两种基本描述: 时域和频域特性。这两种描述是互补的, 具有同等重要的作用。

1.1 信 号 分 类

在数学上, 信号用一组变量值表示。若 $\{s(t)\}$ 是一实或复数序列, 则称序列 $\{s(t)\}$ 为信号。当时间 t 定义在连续变量区间, 即 $t \in (-\infty, \infty)$ 或 $t \in [0, \infty)$ 时, 序列 $\{s(t)\}$ 称为连续时间信号。许多人工信号和自然信号都是连续时间信号, 例如雷达、声纳、无线电广播、通信、控制系统和生物医学工程中的信号。在使用计算机进行信号处理时, 连续时间的信号需要先转换成离散时间信号。若信号取值的时间 t 为整数, 即 $t = 0, \pm 1, \dots$ 或 $t = 0, 1, \dots$ 时, 则变量序列 $\{s(t)\}$ 称为离散时间信号。注意, 离散时间信号与数字信号有所不同, 后者是其数值被数字化后的离散时间信号。

如果序列 $\{s(t)\}$ 在每个时刻的取值不是随机的, 而是服从某种固定函数的关系, 则称之为确定性信号。下面是几种常用的确定性信号。

- 阶跃信号

$$U(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1.1.1)$$

- 符号信号

$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \quad (1.1.2)$$

- 矩形脉冲

$$P_a(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq a \\ 0, & |t| > a \end{cases} \quad (1.1.3)$$

• 正弦波 (或谐波) 信号

$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \theta_0) \quad (1.1.4)$$

其中 θ_0 为固定的初始相位。

作为例子, 图 1.1.1 分别画出了阶跃信号、符号信号和矩形脉冲信号的波形。

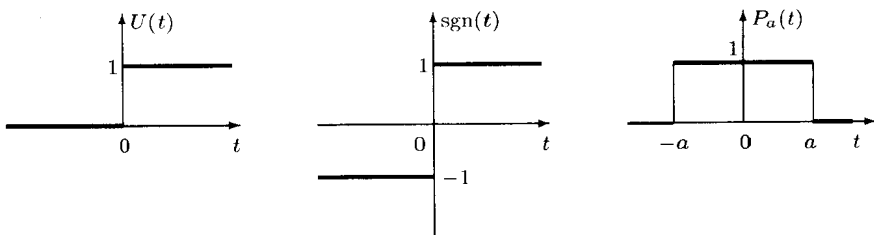


图 1.1.1 阶跃信号、符号信号与矩形脉冲

与确定性信号不同, 若序列 $\{s(t)\}$ 在每个时刻的取值是随机变量, 则称之为随机信号。例如, 相位随机变化的正弦波信号即为随机信号:

$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \theta) \quad (\text{实谐波信号}) \quad (1.1.5)$$

$$s(t) = A \exp(j\omega_c t + \theta) \quad (\text{复谐波信号}) \quad (1.1.6)$$

式中 θ 是在 $[-\pi, \pi]$ 内均匀分布的随机变量, 即其分布函数为

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.1.7)$$

随机信号也称随机过程, 具有以下特点:

- 随机信号在任何时间的取值都是不能先验确定的随机变量。
- 虽然随机信号取值不能先验确定, 但这些取值却服从某种统计规律。换言之, 随机信号或过程可以用概率分布特性 (简称统计性能) 统计地描述。

令 $x(t)$ 表示一连续时间的复随机过程。对于任何一固定的时刻 t , 随机过程 $x(t)$ 定义一随机变量 $X = x(t)$ 。令 $\mu(t)$ 表示其均值, 则

$$\mu(t) = E\{x(t)\} \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} x f(x, t) dx \quad (1.1.8)$$

式中 $f(x, t)$ 表示随机变量 $X = x(t)$ 在时间 t 的概率密度函数。复随机信号 $x(t)$ 的

试读结束, 需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com