



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

# 现代信号处理及工程应用

何正嘉 訾艳阳 张西宁



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学

TN911.7/67

2007

内容简介

研究生创新教育系列教材

# 现代信号处理及工程应用



何正嘉 訾艳阳 张西宁

西安交通大学出版社

· 西 安 ·

## 内容简介

本书介绍了现代信号处理技术的基本原理和工程实用技术。阐述了平稳和非平稳信号的特点,信号数学变换的本质,信号正交分解的物理意义和工程背景。内容包括信号的时域分析、频域分析、循环平稳信号分析、时频分析、小波变换及第二代小波变换、经验模式分解等。列举了所介绍的方法和技术在工矿企业中机电设备动态分析与监测诊断方面的应用实例。

本书取材先进,实用性强,适合作为高等院校机械工程、仪器仪表和能源动力等专业的研究生、高年级本科生的教材或参考书,也可供从事机电设备动态分析、状态监测、故障诊断、设备管理与维修的广大科技人员使用和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代信号处理及工程应用/何正嘉, 菅艳阳, 张西宁编  
著. —西安:西安交通大学出版社, 2007. 10  
(研究生创新教育系列教材)  
ISBN 978-7-5605-2546-4

I. 现… II. ①何… ②菅…③张… III. 信号处理-研究生-教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 155945 号

书 名	现代信号处理及工程应用
编 著	何正嘉 菅艳阳 张西宁
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 10 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	陕西丰源印务有限公司
字 数	293 千字
开 本	727 mm×960 mm 1/16
印 张	16.125
版 次	2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷
印 数	000 1~3 000
书 号	ISBN 978-7-5605-2546-4/TN·102
定 价	25.00 元

版权所有 侵权必究

# 总 序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法,把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式,把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,有许多艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

# 前 言

作为一所研究型大学,西安交通大学在国家“211”工程和“985”建设中,正在成为新一代科学家和原创性成果的摇篮,成为新知识、新科技、新发明的重要源头。学校的“985”二期建设加大了研究生培养和素质教育的力度,为适应我校2004年研究生教学改革修订的研究生培养方案,大面积地开展研究生创新教育的教材建设,我们编写了《现代信号处理及工程应用》这一学位课程教材。

本教材取材于作者所在单位近年来获得的国家级和省部级科技成果研究内容,引用已承担的国家“973”、“863”、国家自然科学基金重点项目和面上项目以及企业委托项目的最新研究进展。这本学位课程教材由两种教材融合而成:第一种是西安交通大学机械工程学院智能仪器与监测诊断研究所编写的校内研究生教材《机械测试信号处理》;第二种是西安交通大学机械工程学院机械制造及自动化研究所编写的《机械设备非平稳信号的故障诊断原理与应用》,并获得国家自然科学基金研究专著出版基金的资助,于2001年由高等教育出版社出版发行。新教材吸收现代信号处理前沿内容,兼顾了经典平稳信号和现代非平稳信号处理方法,具有学科交叉、新颖性和创造性等特点。这本40学时的教材,适用于机械工程、仪器科学与技术两个一级学科及其下属的二级学科,包括机械制造及其自动化、机械电子工程、机械设计理论、车辆工程、精密仪器及机械和测试计量技术及仪器等。教材备有大量来自机械工程、仪器科学与技术学科领域的工程应用实例,既阐明现代信号处理的基本原理,又介绍如何应用于工程实践,有利于研究生掌握基础理论和培养创新能力。

现代信号处理内容十分丰富,限于学时数的规定,这本教材针对机电系统动态分析与监测诊断科学研究和工程应用,汇集了现代信号处理领域中的一些重要内容。虽然没有包括许多卓有成效的方法,如自适应滤波、二维信号处理、多元时间序列分析、非高斯信号处理、分数阶傅里叶变换等等,但教材所涉及的内容突出了现代信号处理中的平稳与非平稳、线性与非线性两个重要问题的分析思路,期望通过书中内容的介绍,对研究生起到抛砖引玉、触类旁通的作用。

西安交通大学坚持以育人为中心,培养造就一流的人才,是建校110多年来坚守不渝的宗旨,是学校一切工作的出发点。在高等学校中研究生是科技创新的一支生力军,要用科学精神引导和培养研究生。所谓科学精神就是追求自然客观世界的本质,追求认识的真理性和客观性,坚持认识的客观性和辩证性。科学精神也

是科学研究中所必备的精神状态和思维方式,是由探索和追求真理这一活动的性质所决定的。加强科学精神教育,有助于研究生树立起对待自然、社会与人生的科学态度,有助于研究生自觉接受正确的世界观、价值观和人生观,有助于形成创造性的思维和能力,有助于培养勇于开拓进取的精神。我们希望在讲授这本教材的过程中,力图为造就一支具有追求理想、严谨求实、淡泊名利的科学精神的研究生队伍。我们要铭记我校校友、九十高龄的杰出的科学家钱学森在2001年写下感人至深的寄语:“希望西安交通大学全体师生要继承和发扬母校优良传统,热爱祖国、崇尚科学、追求真理、报效人民,在二十一世纪,努力把西安交通大学建设成世界一流大学。”我们教师首先要真正成为科学精神教育的直接示范者和教育者,甘于寂寞,甘于清简,以身作则,将教书育人贯穿于培养研究生的全过程。《论语》中孔子说:“君子食无求饱,居无求安,敏于事而慎于言,就有道而正,可谓好学也已。”我们提倡一个科技工作者在饮食上不追求丰满,在居住上不追求舒适,从事科技工作要敏捷勤奋,发表观点要求实谨慎,接近有道德的人匡正是非,这样的人可以说是爱好学习的了。在《现代信号处理及工程应用》的教学进程中,师生共勉,使我们自己都成为新世纪的好学者。

本书第1章(第3、4、5节)、第5章、第6章(第1节)、第7章和第8章由何正嘉完成,第4章、第6章(第2、3节)由訾艳阳完成,第1章(第1、2节)、第2章、第3章由张西宁完成。全书由何正嘉和訾艳阳统稿、校对和修改。博士生姜洪开、祁克玉分别参与第7章、第8章的撰写,博士生雷亚国、王衍学、袁静、张小丽等人承担了书稿的绘图、查对及其它方面的工作。作者感谢国家自然科学基金重点项目“大型复杂机电系统早期故障智能预示的理论与技术”(50335030)的资助,感谢我校研究生院研究生创新教育教材建设的资助,感谢西安交通大学出版社为本书出版付出的辛勤劳动。谨向长期以来关心和支持我们工作的众多同仁致以衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中一定有疏漏和不妥之处,殷切希望得到宝贵的批评和指正。

何正嘉

2007年8月于西安

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	(1)
1.1 现代信号处理的内容和意义 .....	(1)
1.2 信号的分类 .....	(2)
1.2.1 确定性信号 .....	(3)
1.2.2 随机信号 .....	(3)
1.3 非平稳信号处理和信号的正交分解 .....	(5)
1.3.1 非平稳信号处理 .....	(5)
1.3.2 信号的正交分解 .....	(8)
1.4 信号处理的内积与基函数 .....	(10)
1.5 现代信号处理的应用现状与进展 .....	(14)
参考文献 .....	(18)
<b>第2章 信号的时域分析</b> .....	(21)
2.1 信号的预处理 .....	(21)
2.1.1 信号的滤波处理 .....	(22)
2.2 信号的采样 .....	(27)
2.2.1 采样与混频 .....	(28)
2.2.2 量化与误差 .....	(28)
2.2.3 窗函数与泄漏 .....	(30)
2.2.4 采样长度与分辨率 .....	(32)
2.3 时域统计分析 .....	(32)
2.3.1 时域指标参数 .....	(32)
2.3.2 参数指标的应用 .....	(34)
2.4 相关分析及应用 .....	(37)
2.4.1 相关的概念 .....	(37)
2.4.2 自相关函数及其应用 .....	(38)
2.4.3 互相关函数及其应用 .....	(40)
参考文献 .....	(44)

<b>第3章 信号的频域分析</b> .....	(45)
3.1 信号的频谱和FFT算法及应用 .....	(45)
3.1.1 傅里叶级数与离散频谱 .....	(45)
3.1.2 傅里叶变换与连续频谱 .....	(47)
3.1.3 离散傅里叶变换(DFT) .....	(49)
3.1.4 快速傅里叶变换 .....	(50)
3.1.5 FFT的校正算法 .....	(52)
3.1.6 确定性信号的傅里叶谱分析 .....	(54)
3.1.7 功率谱密度函数 .....	(55)
3.1.8 频谱分析的工程应用 .....	(56)
3.2 相干分析及应用 .....	(58)
3.2.1 相干函数的概念 .....	(58)
3.2.2 相干函数的工程应用 .....	(58)
3.3 频谱细化分析(ZOOM-FFT) .....	(60)
3.3.1 频谱细化的概念 .....	(60)
3.3.2 复调制细化分析的原理 .....	(60)
3.3.3 复调制细化分析的应用 .....	(62)
3.4 倒频谱(Cepstrum)分析及应用 .....	(63)
3.4.1 倒频谱的数学描述 .....	(63)
3.4.2 倒频谱与解卷积 .....	(63)
3.4.3 倒频谱的应用 .....	(64)
3.5 信号调制与解调分析 .....	(65)
3.5.1 实信号的复数表示 .....	(65)
3.5.2 Hilbert变换 .....	(66)
3.5.3 Hilbert解调原理 .....	(67)
3.5.4 信号解调分析的应用 .....	(67)
3.6 时间序列建模与自回归谱分析 .....	(69)
3.6.1 谱估计原理及常见的参数模型 .....	(69)
3.6.2 AR模型的建立 .....	(70)
3.6.3 AR模型阶次的确定 .....	(71)
3.6.4 AR谱估计及应用 .....	(72)
3.7 全息谱理论和方法 .....	(74)
3.7.1 全息谱理论和技术 .....	(75)
3.7.2 全息谱方法的应用 .....	(79)



参考文献 .....	(81)
<b>第4章 循环平稳信号分析 .....</b>	<b>(83)</b>
4.1 循环平稳信号的定义 .....	(84)
4.2 信号的循环统计量 .....	(84)
4.2.1 循环统计量 .....	(84)
4.2.2 一阶循环统计量——循环均值 .....	(85)
4.2.3 二阶循环统计量——循环自相关函数 .....	(86)
4.2.4 功率谱密度函数 .....	(90)
4.3 基于二阶循环统计量的仿真信号解调分析 .....	(93)
4.3.1 调频信号的解调分析 .....	(93)
4.3.2 多载波调频信号的解调 .....	(95)
4.3.3 多调制源调幅信号的解调 .....	(98)
4.3.4 多载波调幅信号的解调 .....	(100)
4.3.5 循环相关解调法识别信号有用信息和混频信息的规律 .....	(103)
4.4 循环平稳信号处理的工程应用 .....	(103)
4.4.1 齿轮箱摩擦故障分析与诊断 .....	(103)
4.4.2 滚动轴承损伤故障分析与诊断 .....	(107)
参考文献 .....	(111)
<b>第5章 非平稳信号处理方法 .....</b>	<b>(112)</b>
5.1 短时傅里叶变换 .....	(112)
5.2 小波变换 .....	(115)
5.2.1 多分辨分析及其工程意义 .....	(118)
5.2.2 正交小波基的构造与信息独立化的提取 .....	(121)
5.3 小波包信号分解与频带能量监测 .....	(128)
5.4 工程应用 .....	(133)
5.4.1 轧钢机振动分析 .....	(133)
5.4.2 大型矿山电铲提升系统振动分析 .....	(134)
5.4.3 压缩机齿轮箱轴瓦监测诊断 .....	(138)
5.4.4 汽轮发电机组轴瓦松动故障诊断 .....	(138)
5.4.5 高压透平蒸汽激振分析 .....	(143)
参考文献 .....	(148)
<b>第6章 连续小波变换及其工程应用 .....</b>	<b>(153)</b>
6.1 谐波小波变换及其工程应用 .....	(153)

6.1.1	谐波小波的定义及正交性 .....	(153)
6.1.2	Newland 快速算法 .....	(156)
6.1.3	谐波小波时频图 .....	(157)
6.1.4	谐波小波滤波 .....	(158)
6.1.5	谐波小波应用举例 .....	(161)
6.1.6	小波分形技术原理 .....	(162)
6.1.7	离散信号盒维数的计算 .....	(163)
6.1.8	谐波小波轴心轨迹阵列的实现及其不规则度描述 .....	(163)
6.2	Laplace 小波特征波形相关滤波 .....	(168)
6.2.1	Laplace 小波及其特性 .....	(169)
6.2.2	Laplace 小波基函数相关滤波 .....	(170)
6.2.3	应用实例 .....	(174)
6.3	Hermitian 连续小波变换与信号奇异性识别 .....	(180)
6.3.1	机械故障诊断中的奇异性 .....	(180)
6.3.2	小波变换对信号奇异性检测的基本原理 .....	(182)
6.3.3	Hermitian 小波的定义及特性研究 .....	(186)
6.3.4	Hermitian 连续小波变换及分解结果的表达方式 .....	(187)
6.3.5	微弱准脉冲信号奇异性识别 .....	(189)
6.3.6	齿轮箱止推夹板端面摩擦故障分析实例 .....	(191)
	参考文献 .....	(192)
<b>第7章</b>	<b>基于第二代小波变换的信号处理 .....</b>	<b>(195)</b>
7.1	第二代小波变换原理 .....	(195)
7.2	预测器和更新器 .....	(198)
7.2.1	预测器系数计算方法 .....	(199)
7.2.2	更新器系数计算方法 .....	(200)
7.2.3	预测器和更新器系数特性 .....	(200)
7.2.4	第二代小波尺度函数和小波函数特性 .....	(201)
7.3	第二代小波包分析 .....	(203)
7.3.1	第二代小波包分解和重构算法 .....	(203)
7.3.2	滚动轴承损伤定量识别方法 .....	(204)
7.3.3	工程应用 .....	(205)
7.4	冗余第二代小波变换 .....	(207)
7.4.1	冗余预测器和更新器的设计 .....	(207)
7.4.2	冗余第二代小波分解与重构过程构造 .....	(209)

7.4.3	降噪阈值选取 .....	(210)
7.4.4	工程应用 .....	(212)
	参考文献 .....	(217)
<b>第8章</b>	<b>基于EMD的时频分析方法及其应用 .....</b>	<b>(219)</b>
8.1	EMD的基本理论和算法 .....	(219)
8.1.1	基本概念 .....	(219)
8.1.2	EMD的基本原理 .....	(222)
8.1.3	EMD方法的完备性和正交性 .....	(224)
8.1.4	基于EMD的Hilbert变换(HHT)的基本原理和算法 .....	(226)
8.2	EMD实用化技术研究 .....	(228)
8.2.1	局部均值的求解 .....	(228)
8.2.2	端点效应处理方法 .....	(230)
8.3	基于EMD的Laplace小波结构模态参数识别方法研究 .....	(232)
8.3.1	基于EMD的Laplace小波模态参数识别方法 .....	(232)
8.3.2	应用实例 .....	(236)
8.4	EMD方法在机械设备故障诊断中的应用 .....	(239)
8.4.1	机车轮对轴承损伤定量识别方法 .....	(239)
8.4.2	烟气轮机摩擦故障诊断 .....	(242)
	参考文献 .....	(245)

# 第 1 章 绪论

## 1.1 现代信号处理的内容和意义

随着科学技术的飞速发展,人类步入了信息时代。信息反映了一个物理系统的状态或特性,是自然界、人类社会和人类思维活动中普遍存在的物质和事物的属性<sup>[1]</sup>。一个物理系统的状态或特性是以各种物理量的性质、数量及其相互函数关系或信号来表达的。我们可接触或观察到的信号是承载信息的物理量,是信息的表现形式<sup>[2][3]</sup>。信号的类型多种多样,广义而言,各种文字、语言、图像、电码、古长城上的烽火、海军用的旗语、灯语等都是常用的信号形式。信号处理就是运用数学或物理的方法对信号进行各种加工或变换<sup>[3]</sup>。其目的是滤除混杂在信号中的噪声和干扰,将信号变换成易于识别的形式,便于提取它的特征参数。因此,信号处理的本质是信息的变换和提取。从某种意义上说,信号处理类似于“沙里淘金”的过程:虽然它并不能增加信息量(不能增加金子的含量),但是可以把信息(金子)从各种噪声、干扰的环境中(数量巨大的散落沙子中)提取出来,变换成可以利用的形式(如金条等)。如果不进行这样的变换,信息虽然存在,但却是无法利用的,这正如散落在沙中的金子无法直接利用一样。目前信号处理已经成为了现代科学技术的支柱之一,已广泛应用于人类生产和生活的各个方面。

人的感官每天要直接或间接地接收大量的外界事物,通过大脑有选择、有区别地对接收到的信号进行处理。这一处理就是人类的思维活动,处理得到的信息就是人类对自然界、人类社会及事物运动规律的认识。系统化的认识就形成了我们的知识<sup>[1]</sup>。在日常生活和各项事业中,人们不但要把大量的信息传递出去,同时也千方百计地获取大量的信息。信息的提取就要借助各种信号获取方法以及信号处理技术。例如,医生要了解一个人心脏的信息,往往先让他或她做一个心电图。心电图实质上是一种反映人的心脏跳动的生物电位信号。医生根据专业知识对此心电信号做出分析与处理,才能得到是否有心脏病的信息。再如,对于飞机这样一个大型复杂系统,驾驶员要获得飞机的飞行状态与发动机的工作状态信息,就要对飞行高度、飞行速度、航向、温度、压力、振动等信号进行处理,再结合一定专业知识才

能最终取得飞行是否正常这一信息。

信号处理与分析技术是科学研究的重要手段,同时也是工业领域的一个重要基础技术,而且发挥着越来越大的作用。随着信息化的发展,信息技术不断地渗透到科学研究的各个领域。科学实验、测试信号的处理、工业生产中自动化生产线的测控等都是以信号处理为基础的<sup>[3]</sup>。各种新型材料的性能试验、新设备的研制、新工艺新方法的试验都建立在对测试信号正确和有效的处理和分析的基础之上。高自动化和智能化的机电一体化产品越来越多,他们的设计、试验和运行更离不开信号处理。在各种现代装备系统的制造与实际运行工作中,信号测量系统和信号处理的工作内容已占首位,其成本已达到装备系统总成本的50%~70%<sup>[4]</sup>。随着信息时代的到来,信号处理在我们的生产和生活中的作用将越来越大、越来越重要。下面是信号处理技术的一些具体应用领域<sup>[3][6]</sup>。

电子通讯是最早和最广泛的应用领域。通讯信号的发送与接收采用的调制、解调、滤波、均衡等技术及设备无一不是建立在信号分析与处理的理论与技术的基础上。

机械振动信号的分析与处理是另一个最早应用信号处理技术的领域。在几乎所有的机械工程部门,如机床、飞机、汽车、内燃机、汽轮机、压缩机等机械装备中,信号处理一直是机械振动分析、模态分析、参数识别、故障诊断的基础。

在自动测量与控制工程领域的动态测量、最优值估计与系统辨识等方面,信号分析与处理技术的应用也十分广泛。

信号处理技术还广泛地用于语音处理领域,例如语音分析、语音合成、数字语音通讯、语音计算机识别、声控计算机、计算机语音综合等。

图像处理是信号处理又一迅速发展的新领域。图像处理中的图像编码、图像恢复、图像增强、图像识别等技术已经广泛地应用在军事和国民经济各部门中。如卫星遥感、资源勘探、气象云图、军事侦察、工业CT以及细胞、指纹、相貌、文字识别等领域。

信号处理在水下物体的声纳探测方面取得了广泛的应用。利用潜艇螺旋桨、发动机、艇体振动等声波,经过信号处理后,可分辨出潜艇的类型。

信号处理技术在生物医学工程中也有很多应用。例如通过对心电信号、脑电信号的处理,可以及早发现冠心病或脑部疾患。

## 1.2 信号的分类

按照信号随自变量时间的取值特点,信号可分为连续时间信号和离散时间信号<sup>[3][6]~[7]</sup>。对于任意时间都有信号值,这样的信号称为连续时间信号,从物理上

讲,也通常称之为模拟信号;如果仅在离散的时间点上有信号值,这样的信号称为离散时间信号。在离散信号中,如果信号的取值只能为某个量值(如 A/D 板的分辨率)的整数倍,这样的信号称为数字信号。

通常信号的分类是按照信号取值随时间变化的特点分类的。从这一角度出发,信号可以分为确定性信号和随机信号两大类<sup>[3][5][6]</sup>。确定性信号的所有参数都已经确定,能够用确定性图形、曲线或数学解析式准确描述。该类信号对于给定的某一时刻,都有确定的取值。如单位阶跃信号、单摆运动等。不能用明确的数学表达式来描述的、具有随机性的信号称为随机信号。这里的随机性是指信号在某个时刻的取值,在该时刻以前是不可准确预知。如机床噪声信号、电阻热噪声信号、汽车行驶路面激振信号等。

### 1.2.1 确定性信号

根据信号的时间历程记录是否有规律的重复出现,确定性机械信号可划分为周期信号和非周期信号两类。周期信号又可以分为正弦周期信号和复杂周期信号。非周期信号又可以分为准周期信号和瞬态信号。确定性信号的分类如图 1.2.1 所示。

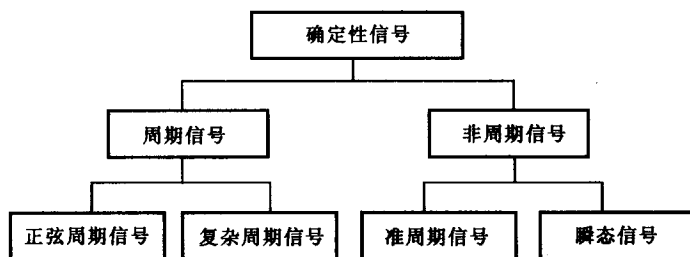


图 1.2.1 确定性信号的分类

### 1.2.2 随机信号

随机信号是随机过程的具体描述。随机信号描述的物理过程具有不可重复性和不可预测性。因而,随机信号不能用确定性函数来描述,信号波形表面看来没有规律,但这种信号波形却有一定的统计规律性。统计特征是随机信号的基本特征,常用概率分布函数和概率密度函数来描述。

对随机信号必须用统计的方法进行处理。要确定随机信号的统计规律性,需要进行多次实验得到多个信号样本,即研究所有可能取得的全部样本集合。例如,汽车从甲地行驶到乙地,我们测量车身上某处垂直方向加速度随时间的变化量,所

得结果就是随机振动记录的一个典型例子。从甲地到乙地行驶  $N$  次所得的振动加速度时间历程(波形)如图 1.2.2 所示。图中  $t$  表示时间,  $x_k(t)$  表示第  $k$  次行驶所测得的加速度值,  $k=1, 2, \dots, N$ 。

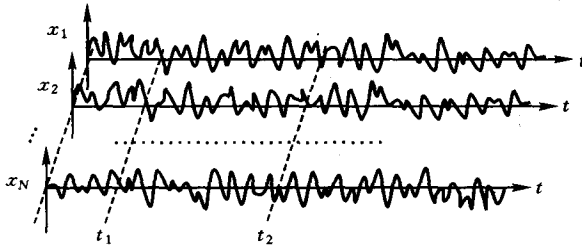


图 1.2.2 随机振动波形记录

显然,图 1.2.2 中,对于某一时刻  $t_1$ ,  $x_k(t)$  随测试次数  $k$  而变化,即每次记录都不可能重复前次的记录。当  $N \rightarrow \infty$  时,  $x_k(t)$  样本的集合就形成一个随机过程。随机过程是时间的函数,但不同于一般函数,它在给定时刻的函数值不是一个数值,而是一个随机变量。例如在某一时刻  $t = t_1$ ,车身上某点的振动加速值,是一个随机变量,它的取值  $x_k(t_1)$ ,  $k=1, 2, \dots, N$ ,是不确定的。同样,在另一时刻  $t = t_2$ ,振动加速度取值也是一个随机变量。

要了解随机信号就必须进行全面观察。由于随机信号具有不可重复性,每次得到的观察结果都不同。由所有可能的随机过程观察结果构成的集合,为总体样本集合。显然,总体样本集合包含了随机振动的全部信息。理论上总体样本集合中元素的数量是无穷多的。总体样本集合的每一个元素就是一个样本函数。它是随机过程的一个物理实现,或是一次观测的结果<sup>[2]</sup>。要得到无穷时间跨度的样本函数是不可能的,因此常用有限时间段的观察结果来近似地表述。有限时间段的观察结果即样本记录。样本记录的时间长度,一般要根据所研究问题、数据处理的特点和需要确定。对于高大建筑物随机脉动过程的样本记录长度也许需要数小时,而在发射阶段火箭振动随机过程的样本记录可能只有几秒钟。

随机信号根据其取值特征,可分为平稳随机信号和非平稳随机信号两类<sup>[3]</sup>。平稳随机信号又可分为各态历经随机信号和非各态历经的随机信号(图 1.2.3)。

在图 1.2.2 中,若总体样本集合中的各个样本函数在任一时刻(如  $t_1$ )的平均值及其它的全部统计特征参数(如概率密度函数、方差、自相关函数、高阶矩等)均不随时间的变化而变化,则称该随机过程为强平稳的或严格平稳的<sup>[8]</sup>。若总体样本集合中的各个样本函数在某一时刻的平均值和方差不随时间变化时,该随机过程称为是弱平稳的。

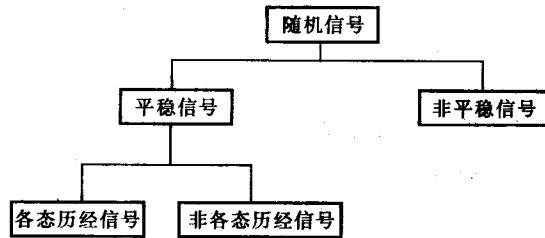


图 1.2.3 随机过程的分类

在平稳随机过程中,若任一样本函数的所有统计特征参数等于样本集的相应统计特征参数,这种平稳的随机过程具有各态历经性<sup>[8]</sup>。对于各态历经的随机过程,其所有特征参数可以用一个样本函数沿时间的平均来代替随机过程总体样本集合的平均。各态历经随机过程的每个样本函数在概率意义上代表了所有其它的样本函数<sup>[3]</sup>。

## 1.3 非平稳信号处理和信号的正交分解

### 1.3.1 非平稳信号处理

随着机电设备状态监测和故障诊断工作在我国国民经济各工矿企业中不断深入开展,所面临的监测诊断对象和问题日趋复杂和困难,其关键问题之一是如何对监测诊断中得到的机械动态信号的非平稳性进行有效地分析。所谓非平稳性,是指信号的统计特性与时间变化有关<sup>[9][10]</sup>。信号的统计特性包括时域统计特性(如均值、方差、偏斜度、峭度等)和频域统计特性(如频谱、功率谱、互谱、相干分析等)。

工程中设备运行状态千变万化,存在着大量的非平稳动态信号。机械设备在运行过程中的多发故障,如剥落、摩擦、松动、爬行、冲击、裂纹、断裂、喘振、旋转失速、油膜涡动及油膜振荡等,当故障发生或发展时将导致动态信号非平稳性的出现。因此,非平稳性可表征某些故障的存在。工矿企业中有许多变工况机电设备,如冶金轧机、矿山电铲、调速电机、破碎机、发动机、往复机械等,它们在运行过程中的转速、功率、负载等往往是变化的,其运行状态具有非平稳性。还有些设备,如发电机组、离心压缩机、风机等,它们在启、停机时转速、功率等工况是非平稳的。一些机电设备在运行中的阻尼、刚度、弹性力、驱动力的非线性及动态响应的非线性,反映在动态信号上具有非平稳性。即使稳态运行的旋转机械,当出现碰摩、冲击等故障时,其转子的阻尼、刚度、弹性力等都发生变化,呈现出非线性,振动信号变得



非平稳。种种情况表明,从工程中获得的动态信号,它们的平稳性是相对的、局部的,而非平稳性是绝对的、广泛的。

正因为非平稳动态信号的统计特性与时间有关,所以对非平稳信号的处理必须同时进行时域、频域分析。在机电设备监测诊断中,目前通常采用基于平稳过程的经典信号处理方法,分别仅从时域或频域给出信号的统计平均结果,无法同时兼顾信号在时域和频域的全貌和局部化特征,而这些局部化特征恰是故障的表征。

传统的快速傅里叶变换(FFT)方法是长期使用的有效工具,我们对它怎么赞美都不过分。它是用平稳的正弦波作为基函数去分解信号  $x(t)$ , 得到其频谱  $X(f)$ 。这一变换建立了一个从时域到频域通道。频谱  $X(f)$  显示了包含在  $x(t)$  中的任一频率  $f$  的总强度。傅里叶变换是时域和频域的一种全局性的变换,不能同时进行时频分析。人们在傅里叶分析的基础上作了大量的研究,提出并发展了一系列新的信号分析理论,在非平稳信号处理方面取得了令人瞩目的成就,极大地促进了现代信号处理学科和技术的发展。文献<sup>[9]</sup>详细地论述了当代非平稳信号处理的理论和技术:短时傅里叶变换、Cohen 类时频分布、Wigner-Ville 时频分布、Gabor 变换、Radon-Wigner 变换、分数阶傅里叶变换、小波变换和小波包分析、线调频小波变换、循环平稳信号分析以及调幅-调频信号分析等等。使读者如同置身于美丽宽广的海滨,找到了通向深邃多彩的海底世界之门。

本书涉及到的非平稳信号处理的方法主要有短时傅里叶变换、小波变换和小波包分析、第二代小波变换、循环平稳信号分析、经验模式分解和 Hilbert-Huang 变换,以及不同特色和功能的的小波基函数的运用。

短时傅里叶变换是 D. Gabor 在傅里叶变换的基础上,于 1946 年提出的一种典型时频分析方法<sup>[10]</sup>,他在那篇著名的《通信理论》论文中生动形象地指出:

“迄今为止,通信理论的基础一直是由信号分析的两种方法组成的:一种将信号描述成时间的函数,另一种将信号描述成频率的函数(Fourier 分析)。这两种方法都是理想化的……。然而,我们每一天的经历——特别是我们的听觉——却一直是用时间和频率两者来描述信号的。”

人们的语音信号是最典型的非平稳信号,对非平稳信号要进行时频分析是理所当然的了。所谓短时傅里叶变换,是用一个时间宽度很短的、可以在时间坐标上滑动的窗函数与信号相乘再来进行傅里叶变换。它具有明确的物理意义,可视为信号在分析时间  $t$  附近由时间窗限定的一小段信号的“局部频谱”,得到由时间  $t$  和频率  $f$  确定的二维时频分布。可以说,短时傅里叶变换架起了从傅里叶变换到小波变换的桥梁。

小波变换思想是由法国从事石油信号处理的工程师 J. Morlet 在 1984 年首先提出<sup>[11]~[13]</sup>,他发现所分析的信号中,高频成分一般持续时间较短,而低频成分一