



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

# 小波变换理论及其 在制造业中的应用

**Wavelets Theory and Applications for  
Manufacturing**

[美] 高晓阳 (Robert X Gao) 严如强 (Ruqiang Yan) 著  
姚福来 等译

 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 小波变换理论及其 在制造业中的应用

[美] 高晓旻 (Robert X Gao) 严如强 (Ruqiang Yan) 著  
姚福来 等译

机械工业出版社

本书系统地介绍了从傅里叶变换到小波变换的历史背景及相关数学基础,深入浅出地讨论并演示了小波变换理论在制造业中涉及实际应用及解决问题的具体步骤;讨论了如何将小波变换与模糊逻辑、神经网络等其他算法结合在一起,以提高机械系统的故障检测、分类的准确度。本书还介绍了其他几种在工程实践中常用的信号处理算法,并对这些算法与小波变换进行对比,以帮助读者对这一领域有更为全面的了解。此外,本书还讨论了如何选取基小波,如何根据被测系统的动态特性设计基小波,以进一步提高弱信号检测的成功率等相关内容。本书既可作为硕士生和博士生的教材,还可作为工程技术人员的参考用书。

Translation from English language edition:

Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing

by Robert X Gao and Ruqiang Yan

Copyright © Springer Science + Business Media, LLC 2011

Springer is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 出版社授权机械工业出版社在中华人民共和国境内地区(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区),出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2016-3793 号。

## 图书在版编目(CIP)数据

小波变换理论及其在制造业中的应用/(美)高晓阳(Robert X Gao), (美)严如强(Ruqiang Yan)著;姚福来等译. —北京:机械工业出版社, 2018. 11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing

ISBN 978-7-111-61407-4

I. ①小… II. ①高…②严…③姚… III. ①小波理论-应用-制造业-研究 IV. ①F407.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 261193 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:林春泉

责任校对:樊钟英 封面设计:马精明

责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12 印张·237 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-61407-4

定价:68.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

# 译者的话

译者在美国康涅狄格大学 AIM 实验室做访问学者和博士后工作时，有幸认识了在该校任教的高晓旻教授（Robert X Gao），并拜读了他和严如强（Ruqiang Yan）教授合著的《Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing》一书。高教授是 IEEE、ASME、SME 和 CIRP 等专业学会的会士，他的团队在小波变换这一研究领域取得了丰硕的成果。随着大数据时代的来临，在数据处理方面有独特优势的小波变换有着广阔的应用空间，所以译者觉得有必要将这样一部优秀的作品推荐给国内的读者。经高教授同意，译者将本书推荐给了机械工业出版社的林春泉编辑。由于译者的英语水平有限，在翻译过程中，高教授和严教授给予了大力的支持，为了让译本做到既忠实英文原著又符合中文习惯，他们做了大量的工作。后来高教授受邀到美国凯斯西储大学机械与航空系担任系主任，在繁忙的工作中，他仍抽出时间，帮助译者完成了本书中译文的修改和校订。在此向高教授、严教授和在本书出版的过程中给予了大力支持的林春泉编辑一并表示感谢！

本书原书前言和中英文对照表中的部分内容 by 王慧工程师翻译，第 1 章的部分内容由姚雅明工程师翻译，其余部分由姚福来研究员完成。

译者  
2018 年 10 月

# 原 书 前 言

自从艾尔弗雷德·哈尔关于正交函数系统问世 100 年以来，世界见证了小波变换理论和实践的极大发展。此间虽然时有报道，但是直到 20 世纪 80 年代，有关这个学科领域的系统性研究及其工程应用的报道才渐渐出现。在过去的 30 年里，涌现出了一大批描述小波变换理论的发展及其在各个工程领域成功应用的文献，如生物医学工程的图像处理及气象学的信号处理和土木工程中的桥梁监测等。小波变换的自适应性及多分辨能力也使它成为制造中设备运行状况监测与诊断（例如刀具破损诊断）工作中强有力的数学工具。

基于小波变换理论和应用研究的大量论文对推动科学技术的发展起到了重大影响。这些论文，连同一系列经典的专业书籍，向一代又一代的科研工作者和工程技术人员传授了有关小波变换理论和应用知识。然而，迄今为止，专门适合于制造工程相关专业研究生和工程技术人员阅读，能帮助他们学习、掌握如何应用小波变换理论来解决机械设备和生产过程的监测、诊断与预测问题的专著仍显欠缺。

本书通过对小波变换理论系统、简洁的描述，说明了如何将小波变换理论作为一种数学工具应用到制造工程中，从而填补了这一空白。促进制造工程技术人员对小波变换理论的理解和应用是写作本书的主要目的，本书对这个蓬勃发展的科研领域中的最新成果作了全面的叙述。

本书的重点是信号处理。在这个基础上，本书的第 1 章首先从统计学的角度介绍了机械系统中常见信号广义的分类方法：确定性信号与非确定性信号。使用质子-弹簧-阻尼系统作为物理系统的实例，首先描述了确定性信号的解析表达式、相关波形和它的解，并与不确定性信号进行了对比。随后，本章引入了非平稳信号的概念及其讨论，这也是本书为什么要将小波变换引入制造工程研究的基本动机。通过对制造过程中两个有代表性的测量信号的分析，建立了制造工程和信号处理之间的联系，并提出了正确处理非平稳信号的要求，从而进一步阐明本书致力于此主题的理由。

第 2 章回顾了自 19 世纪傅里叶变换提出以来，在信号处理领域中发生的一些重大事件，从而加深对频谱分析的历史意义的理解。这些事件引发并伴随了小波变换理论的提出、发展和完善。基于信号变换（其目的是揭示信号的信息内容）从广义上来讲可以通过对信号与一个已知的模板函数之间的卷积运算来表示的思路，本章对傅里叶变换及改进后的短时傅里叶变换（分析窗口的长度固定）与小波变换（分析窗口的长度可变）之间的共性作了明确的阐述。

第 3~5 章主要介绍了有关小波变换的本质，以及如何应用它来处理制造过程

中经常遇到的非平稳信号的一些数学基础知识。基于大量有关小波变换的优秀书籍虽已出版,但针对许多研究生和工程技术人员仍然对实现小波变换的数学过程详细解释有所需求这一现状,我们在编写本书时兼顾了理论和具体实施介绍的均衡。具体来说,在第3章介绍连续小波变换时,首先描述了连续的正弦波和从本质上来说是一种满足容许性条件的线性积分变换的时域本征小波之间的相似性。为帮助读者了解最常遇到的有关连续小波变换(CWT)的特性,对叠加、平移和伸缩条件下的协方差以及 Moyal 定理等概念进行了描述,同时给出了这些特性的数学证明。通过提供这些详细的证明,希望鼓励那些最初对与小波相关的数学知识尚存恐惧的读者们获取信心,帮助他们从既实用又能满足数学严谨性的角度去学习、理解小波变换,而不是仅仅套用现成的计算公式。随后,书中采用了两种不同的途径来展示如何逐步实现连续小波变换的具体步骤,从而展示给读者如何使用相关的背景信息,最终实现对一些典型信号进行连续小波变换的处理。

考虑到连续小波变换虽然可以对信号在时-频域进行高分辨率的二维分解,但由于冗余数据的产生和计算过程较为复杂,本书第4章介绍了离散小波变换(DWT)。与连续小波变换相比,离散小波变换具有更高的计算效率,因而更适合于图像压缩和实时计算的应用。以对数离散化为例,首先讨论了如何进行参数离散化,以保证离散小波变换过程结束后信息的正确提取。为具体说明这一思维过程,本书提供了一些推导上的细节。随后介绍了建立在多分辨率分析(MRA)理论基础上的二价离散化的方法,以构建正交基小波。为满足那些可能有兴趣了解更多关于“为什么”要进行多分辨率分析和“怎么做”的读者,本书补充了一些细节上的数学解释,说明为什么离散小波变换过程会导致细节信息和近似信息的产生,从而最终阐明离散小波变换的过程实质上是进行一系列的低通和高通滤波操作。这些操作可以通过 Mallat 的算法得以实现。相应于第3章的结构,给出了几种常用的离散小波变换的基小波,并说明如何通过设立软、硬阈值的方式用离散小波变换实现信号去噪。

虽然在信号分解时具有灵活的时-频分辨率,离散小波变换在分析高频区域的信号时分辨率相对较低。这一局限性导致了小波包变换(WPT)的产生,也是本书第5章的重点内容。在对小波包变换的定义和基本属性的描述之后,介绍了两种实现小波包变换的算法:Mallat 提出的递归算法和基于傅里叶变换的谐波小波包变换。随后,阐述了如何使用小波包变换来揭示与加工机械的工况状态直接相关的振动信号的时-频成分,以及如何从一个线性调频(啁啾)信号中去除高斯噪声。这些应用实例说明小波包变换因其对高频区域的信号进行高分辨率分解的能力而为我们提供了一个可用来检测和区分具有高频特性的瞬态成分的有力工具。

在对小波变换的基本理论所做描述的基础上,本书的第6~8章介绍了几个小波变换的应用例证,用以说明这一方法的有效性。第一个例证涉及一种常用的无损探伤和结构故障识别方面的技术:信号包络。为了克服传统上需要先验知识去选择

带通滤波器以提取信号包络的局限性,第6章给出了一种基于小波变换的自适应多尺度包络方法(MuSEnS)。利用希尔伯特变换可以提取解析信号包络的这一优点,以及复值小波变换可以产生一个解析信号的事实,演示了如何从相关小波系数的模量计算出信号的包络。为了说明这一技术在信号分解上的有效性,还进一步提供了两个与制造工程相关的应用,即成型注塑过程中无线压力测量时存在的时间重叠、频谱相邻的超声波脉冲分离以及旋转机械中的轴承故障诊断。利用实验测得和模拟合成的两种信号,我们展示了如何用小波变换对信号进行定量分析。

虽然小波变换的局部信号分解能力对瞬态事件辨识行之有效,小波分析的结果并不明确显示往往预示着机器故障的信号特征频率,例如当轴承内圈滚道存在局部点蚀时,轴承滚珠或滚柱经过该点时的通过频率( $f_{BPF1}$ )。在这种情况下,可以通过傅里叶变换来增强小波变换在识别信号频率分量上的效果。这一理念导致了一项我们称之为统一时间-尺度-频率分析技术的形成。具体来说,该项技术通过对小波变换后的小波系数进行频谱后处理来提高故障诊断的有效性。在广义信号变换的框架下,我们在第7章证明了这样一个综合方法的可行性。首先给出了广义框架下傅里叶变换和小波变换的表达式,从而建立了跨接两种变换的基础。接下来对小波变换后的数据进行后频谱分析的可行性给出了分析证明,并对该技术在识别各种工况下轴承故障的有效性给出了实验验证。

检测到故障后,接下来的问题就是故障的严重程度如何,因为这会影响机械维修保养策略的合理制定。为回答这个问题,在第8章以滚动轴承的振动信号为例,论述了如何应用小波包变换对机械故障严重程度进行分类。从讨论小波包变换后的子频带信号的相关特征(例如能量或峭度值)开始,论述了小波包变换如何从分解信号的子频带灵活提取特征。第8章还包含了一旦获得这些特征后,如何处理这些特征以用于故障严重程度分类的进一步讨论,比如利用Fisher线性判别分析和主成分分析等方法,选择最合适的故障严重程度的量化分类。在本章的最后给出了两个关于滚珠轴承和滚柱轴承的案例分析,并借此确定了小波包变换用于故障严重程度分类的有效性。

第9章继续讨论信号分类,主要着眼于如何区分不同工况下机器的故障诊断。首先引入了判别特征的概念,并对一种称为局部判别基(LDB)的技术进行了详细描述。简言之,局部判别基算法确定了一组最优小波包节点集(每个节点对应于一个小波包基)来描述在机器不同状态(即不同的分类)下获取的信号。与第5章介绍的用于信号压缩的香农熵特征相类似,本章介绍了几个适合于旋转机械诊断的特征量,例如相对熵或关联指数。为帮助读者理解如何实现局部判别基算法,我们对算法进行了逐步描述。通过对添加了白噪声的三种合成信号,以及在不同磨损状态下测得的齿轮箱振动信号的分析,我们对使用局部判别基算法建立的小波包基比不使用该算法能更有效地鉴别和分类这些信号给出了定量的演示。

鉴于在已发表的文献中对于各类基小波已多有报道,如何选择一个最佳的基小



波来分析特定类型的信号这一问题就自然而然地被提了出来。这个问题的提出来源于下述考虑：①基小波的最初选择直接影响信号分析的最终结果。②每一个基小波都是根据不同的目的或重点设计而来的，因此在解决特定类型的工程问题时，就应该有意识地去选用适当的基小波。在本书中，我们采用两种方法回答这一具有重要学术意义的问题。首先在第10章介绍了如何使用定性（如正交性和紧支集）和定量的方法（例如，香农熵和鉴别能力）选择基小波的总体策略。随后，我们提出了几个选择基小波的准则，包括能量-香农熵比和最大信息测度。利用实值和复值基小波阐述了如何应用这些准则从一组候选小波中选择一个最适合的基小波，并使用一个模拟的高斯调制正弦信号和实际测得的有故障球轴承的振动信号来对这些准则的有效性加以认证。

除了研究如何从已有的小波库中选择适当的基小波外，另一种思路是设计一个适应特定应用类型的、自行定义的“定制小波”，以最大限度地实现与被分析信号的匹配，从而提高特征提取的有效性。本书第11章重点介绍了这一技术。在回顾了小波设计过程中所涉及的基本问题和几个定制小波的例子之后，详细地描述了一种基于轴承机械结构的冲击响应所构建的冲击小波的设计过程，及其用于轴承振动分析的结果。设计中强调了满足扩展方程以避免在信号重构过程中信息损失的重要性，并描述了满足这一要求的具体设计步骤。接下来用设计出的冲击小波对从一个存在故障的轴承测得的振动信号进行了分析，并以故障特征频率的信噪比作为评价尺度，将分析结果与使用小波库中5个标准小波的结果进行了对比。冲击小波的良好性能证实了定制小波的理论设计方法对增强工程应用中信号分析的有效性。

本书的最后一章对近些年来继经典小波变换理论之后的一些最新进展进行了简要介绍。这些最新进展解决了使用小波变换分析有限长度以及/或者有限持续时间的信号或捕捉与定义图像边界时所面临的一些局限性。从介绍“提升方案”取代平移和扩张来构造小波的传统机制，从而实现第二代小波变换（SGWT）的思路入手，对实现二代小波变换的主要操作步骤，如分裂、预测和更新等进行了描述，并展示了用第二代小波对间歇性线性调频信号的分离和重建技术的有效性。为解决经典小波固有的局限性（例如各向同性）和图像处理中的特定挑战（例如图像边界的解析），随后介绍了脊波变换和曲波变换。前者被用于满足图像各向异性特征分析的需要，而后者则能够提高对图像曲线边界的表达。对于每一种变换，本书都给出了定义及其基本属性，并展示了其在制造工程中的代表性应用。

毋庸置疑，本书所表达的是作者对这一主题的理解和认识。我们虽然尽力呈现给读者一本既有严谨的数学处理又有适宜的例证支持的专著，错误的出现仍难以避免。对本书中任何有误的描述我们深表歉意并承担责任，且非常希望听到读者们的反馈，以帮助我们在今后的再版中纠正这些错误。

借此机会，我们向各位提供了洞察深刻、富有建设性意见的匿名审稿人深表感谢。这些意见使得我们的思维更为敏锐，从而更为清晰地展示本书的技术内容。我



们特别感谢曾在机电一体化 (EMS) 实验室工作过的博士研究生们, 是他们的贡献使得本书成为现实。尤其要感谢 Brian Holm - Hansen、王常庭和张黎等博士, 他们研究工作的很大一部分内容涉及小波变换对制造机械和加工过程的故障诊断。另外, 何清波博士花了一年时间在 EMS 实验室从事有关人体运动特征提取的博士后研究工作。他们对探索小波世界所表现出的奉献和热情为本书的撰写奠定了扎实的基础。我们也感谢美国国家科学基金会 (NSF) 为一系列相关的研究项目提供资助, 从而使得我们能够系统地研究小波变换这个令人振奋的课题。

这本书的写作最初计划在一年内完成。但此间发生的诸多事宜延迟了计划的实施, 以致最终花了大约两倍的时间才使本书得以完稿。借此机会我们向支持本书撰写的 Springer 出版社表示衷心感谢, 特别要感谢工程类书籍高级编辑 Stephen Elliot 先生和编辑助理 Andrew Leigh 先生的诚挚合作以及在编辑过程中对我们给予的帮助。尤其感谢他们的理解和耐心, 这为我们在处理诸多事宜的同时仍能完成本书的写作创造了一个宽松的环境。最后, 真诚地感谢我们各自的家人对我们给予的理解。她们为我们承担了许多, 从而让我们有尽可能多的时间投入到本书的写作中。我们衷心希望本书的出版是对她们为此所做的无私支持的回报, 同时也希望读者们能够从书中发现对他们的研究有价值的内容。

作 者

# 作者简介

高晓暘教授，于 1991 年获得德国柏林工业大学机械工程测试专业博士。自 1992 年起在美国多所大学任教，现任位于俄亥俄州克利夫兰市的凯斯西储大学 (Case Western Reserve University) 机械与航空系主任及 Cady Staley 讲座教授，创建并主持机电一体化研究室，从事微型嵌入式传感器与智能结构设计，节能型可重构传感器网络的设计，非平稳信号处理，大数据分析，机器学习等方面的研究。应用对象涉及机械加工过程与设备状态的智能检测、故障诊断和寿命周期预测，以及飞机发动机、楼宇采暖、通风、空调系统和人体运动等方面的监测。

严如强教授，于 2007 年获得美国马萨诸塞大学机械工程专业博士。自 2009 年 10 月起在东南大学仪器科学与工程学院任教，现任职西安交通大学机械工程学院教授及国际机械中心执行主任。从事机电系统状态监测、故障诊断与剩余寿命预测，生物医学信号检测与处理，数据分析及新一代人工智能等方面的研究。

# 目 录

|      |  |
|------|--|
| 译者的话 |  |
| 原书前言 |  |
| 作者简介 |  |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 制造工程中的信号与信号处理    | 1  |
| 1.1 信号分类               | 1  |
| 1.1.1 确定性信号            | 1  |
| 1.1.2 非确定性信号           | 3  |
| 1.2 制造工程中的信号           | 4  |
| 1.3 信号处理在制造工程中的作用      | 8  |
| 1.4 参考文献               | 10 |
| 第 2 章 历史回顾：从傅里叶变换到小波变换 | 13 |
| 2.1 傅里叶变换              | 14 |
| 2.2 短时傅里叶变换            | 16 |
| 2.3 小波变换               | 19 |
| 2.4 参考文献               | 24 |
| 第 3 章 连续小波变换           | 26 |
| 3.1 连续小波变换的性质          | 28 |
| 3.1.1 叠加性              | 28 |
| 3.1.2 平移性              | 28 |
| 3.1.3 伸缩性              | 29 |
| 3.1.4 Moyal 定理         | 29 |
| 3.2 逆连续小波变换            | 30 |
| 3.3 连续小波变换的实现          | 31 |
| 3.4 一些常用的小波            | 32 |
| 3.4.1 墨西哥帽小波           | 32 |
| 3.4.2 Morlet 小波        | 33 |
| 3.4.3 高斯小波             | 33 |
| 3.4.4 频率 B 样条小波        | 34 |
| 3.4.5 香农小波             | 34 |
| 3.4.6 谐波小波             | 35 |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 3.5 典型信号的连续小波变换 .....     | 36        |
| 3.5.1 正弦函数的连续小波变换 .....   | 36        |
| 3.5.2 高斯脉冲函数的连续小波变换 ..... | 37        |
| 3.5.3 调频函数的连续小波变换 .....   | 37        |
| 3.6 总结 .....              | 38        |
| 3.7 参考文献 .....            | 38        |
| <b>第4章 离散小波变换 .....</b>   | <b>40</b> |
| 4.1 尺度和平移参数的离散化 .....     | 40        |
| 4.2 多分辨率分析和正交小波变换 .....   | 42        |
| 4.2.1 多分辨率分析 .....        | 43        |
| 4.2.2 正交小波变换 .....        | 44        |
| 4.3 双尺度方程和多分辨率滤波器组 .....  | 45        |
| 4.4 Mallat 算法 .....       | 46        |
| 4.5 一些常用的基小波 .....        | 48        |
| 4.5.1 Haar 小波 .....       | 48        |
| 4.5.2 Daubechies 小波 ..... | 49        |
| 4.5.3 Coiflet 小波 .....    | 49        |
| 4.5.4 Symlet 小波 .....     | 51        |
| 4.5.5 双正交和逆双正交小波 .....    | 51        |
| 4.5.6 Meyer 小波 .....      | 52        |
| 4.6 离散小波变换的应用 .....       | 52        |
| 4.7 总结 .....              | 54        |
| 4.8 参考文献 .....            | 55        |
| <b>第5章 小波包变换 .....</b>    | <b>56</b> |
| 5.1 小波包的理论基础 .....        | 56        |
| 5.1.1 定义 .....            | 56        |
| 5.1.2 小波包的性质 .....        | 57        |
| 5.2 递归算法 .....            | 59        |
| 5.3 基于傅里叶变换的谐波小波包变换 ..... | 60        |
| 5.3.1 谐波小波变换 .....        | 60        |
| 5.3.2 谐波小波包算法 .....       | 61        |
| 5.4 小波包变换的应用 .....        | 63        |
| 5.4.1 时频分析 .....          | 63        |
| 5.4.2 小波包去噪 .....         | 63        |
| 5.5 总结 .....              | 65        |
| 5.6 参考文献 .....            | 65        |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第6章 基于小波变换的多尺度信号包络</b>         | 66  |
| 6.1 希尔伯特变换与信号包络                   | 66  |
| 6.2 基于复值小波的多尺度包络                  | 68  |
| 6.3 多尺度包络的应用                      | 69  |
| 6.3.1 注塑成型中用于压力测量的超声脉冲分离          | 69  |
| 6.3.2 旋转机械的轴承故障诊断                 | 75  |
| 6.4 总结                            | 79  |
| 6.5 参考文献                          | 80  |
| <b>第7章 小波变换与傅里叶变换统一框架下的信号分析技术</b> | 81  |
| 7.1 广义信号变换框架                      | 81  |
| 7.1.1 广义框架下的傅里叶变换                 | 83  |
| 7.1.2 广义框架下的小波变换                  | 84  |
| 7.2 小波变换后的频谱处理                    | 86  |
| 7.2.1 测度函数的傅里叶变换                  | 87  |
| 7.2.2 小波提取数据的傅里叶变换                | 88  |
| 7.3 在轴承故障诊断中的应用                   | 89  |
| 7.3.1 故障特征提取的有效性                  | 91  |
| 7.3.2 分解层数的选择                     | 93  |
| 7.3.3 轴承运行工况的影响                   | 95  |
| 7.4 总结                            | 98  |
| 7.5 参考文献                          | 98  |
| <b>第8章 用于故障严重程度分类的小波包变换</b>       | 99  |
| 8.1 子带特征提取                        | 99  |
| 8.1.1 能量特征                        | 99  |
| 8.1.2 峭度                          | 100 |
| 8.2 关键特征选择                        | 101 |
| 8.2.1 Fisher 线性判别式分析              | 101 |
| 8.2.2 主成分分析                       | 103 |
| 8.3 神经网络分类器                       | 105 |
| 8.4 构造基于小波包变换的故障严重程度分类            | 107 |
| 8.5 案例分析                          | 108 |
| 8.5.1 案例分析 I: 滚柱轴承故障严重程度评估        | 108 |
| 8.5.2 案例分析 II: 滚珠轴承故障严重程度评估       | 112 |
| 8.6 总结                            | 116 |
| 8.7 参考文献                          | 117 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>第9章 信号分类的局部判别基</b> | 118 |
| 9.1 相异性测度             | 118 |
| 9.1.1 相对熵             | 118 |
| 9.1.2 能量差             | 119 |
| 9.1.3 相关指数            | 120 |
| 9.1.4 非平稳性            | 120 |
| 9.2 局部判别基             | 121 |
| 9.3 案例分析              | 122 |
| 9.4 在齿轮箱故障分类中的应用      | 125 |
| 9.5 总结                | 128 |
| 9.6 参考文献              | 129 |
| <b>第10章 基小波的选择</b>    | 130 |
| 10.1 基小波选择概述          | 131 |
| 10.1.1 定性测量           | 131 |
| 10.1.2 定量测量           | 132 |
| 10.2 基小波选择准则          | 133 |
| 10.2.1 能量和香农熵         | 133 |
| 10.2.2 信息论测度          | 135 |
| 10.3 基小波选择的数值研究       | 138 |
| 10.3.1 用实值小波评估        | 138 |
| 10.3.2 用复值小波评估        | 142 |
| 10.4 轴承振动信号的基小波选择     | 144 |
| 10.5 总结               | 146 |
| 10.6 参考文献             | 146 |
| <b>第11章 设计自己的定制小波</b> | 148 |
| 11.1 小波设计概述           | 148 |
| 11.2 构建一个冲击小波         | 149 |
| 11.3 冲击小波的应用          | 155 |
| 11.4 总结               | 159 |
| 11.5 参考文献             | 160 |
| <b>第12章 超小波</b>       | 161 |
| 12.1 二代小波变换           | 161 |
| 12.1.1 二代小波变换的理论基础    | 161 |
| 12.1.2 二代小波变换的应用      | 163 |
| 12.2 脊波变换             | 165 |



XIV 小波变换理论及其在制造业中的应用

|              |                 |     |
|--------------|-----------------|-----|
| 12.2.1       | 脊波变换的理论基础 ..... | 165 |
| 12.2.2       | 脊波变换的应用 .....   | 166 |
| 12.3         | 曲波变换 .....      | 168 |
| 12.3.1       | 曲波变换的理论基础 ..... | 168 |
| 12.3.2       | 曲波变换的应用 .....   | 170 |
| 12.4         | 总结 .....        | 171 |
| 12.5         | 参考文献 .....      | 171 |
| 中英文对照表 ..... |                 | 173 |

# 第 1 章 制造工程中的信号与信号处理

“信号”一词是指能够携带某种类型的信息并可作为一种通信媒介的物理量。举例来说，一个安装在一定结构（如机床）上的加速度计所输出的随时间变化的电压就是一个信号，其携带了关于该结构的振动信息。这样的信号就可以作为一种媒介，用于机床工作状态与操作员之间的信息交互。

## 1.1 信号分类

通常情况下，任何信号都可以大致归类为确定性信号或不确定性信号（Bendat 和 Piersol 2000）。确定性信号可以用数学函数明确地定义，如当滚动轴承的重心与旋转中心不重合时造成的不平衡而引起的振动。相比之下，不确定性信号本质上是随机的，通常需要用统计术语描述，比如在加工过程中产生的声发射信号。在实际应用中，一个信号是否属于确定性或不确定性的，依赖于该信号是否在测量中可以重现。可以重复产生相同结果的信号被认为是确定性的，否则被认为是不确定性的。

### 1.1.1 确定性信号

确定性信号有 2 种类型：周期信号和瞬态信号。对它们的简要解释和说明如下。

#### 1. 周期信号

周期信号可定义为在一定的周期或循环后不断重复自己的函数。这样的信号用数学表述为

$$x(t) = x(t + nT) \quad n \in \mathbb{Z} \quad (1-1)$$

式中， $\mathbb{Z}$  表示整数集； $n$  是一个整数； $T > 0$  代表周期。周期信号最简单的例子是正弦信号。

在实际中，许多物理系统能够产生这种类型的信号，一个典型的例子是一个单自由度（SDOF）质量 - 弹簧 - 阻尼系统（Rao 2003）。如图 1-1 所示，质量块  $m$  通过弹簧  $k$  和阻尼器  $c$  连接在墙上，该质量块可以在水平方向移动。该系统在输入力  $F(t)$  的作用下运动（或产生位移），运动可以表示为

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1-2)$$

式中  $x(t)$  代表质量块的位移； $\dot{x}(t)$  代表质量块的速度； $\ddot{x}(t)$  代表质量块的加速度。

我们假设该系统处于自由振动，外部输入力  $F(t)$  为零，并假设阻尼系数  $c = 0$ 。如果该系统最初被拉离平衡位置的距离为  $A_0$ ，释放时的初始速度等于零，即

$$x(t=0) = A_0 \quad \dot{x}(t=0) = 0 \quad (1-3)$$

那么，式 (1-2) 的解将产生一个周期  $T = 2\pi/\omega_n$  的周期信号。这是一个见表 1-1a 的余弦函数。

当系统受到简谐力输入时， $F(t) = F\cos\omega t$ ，一个复杂的周期信号也可以从相同的系统生成（见图 1-1），此时  $c = 0$ 。

见表 1-1b，质量 - 弹簧 - 阻尼系统完整的响应可以表示为两个不同频率的余弦波的总和。

2. 瞬态信号

一个瞬态信号被定义为一个持续时间很短的函数。这样的信号可以由图 1-1 所示的系统产生，系统的阻尼系数  $c \neq 0$  且自由振动，见表 1-1c。

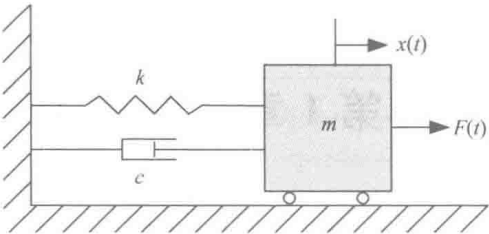


图 1-1 单自由度 (SDOF) 的质量 - 弹簧 - 阻尼系统

表 1-1 确定信号的例子

| 数学表达式                                                                                                                                                                              | 波形 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <p>(a) 简单的周期信号</p> <p>条件:</p> <p><math>c = 0</math></p> <p><math>F(t) = 0</math></p> <p>结果:</p> <p><math>x(t) = A_0 \cos(\omega_n t)</math></p>                                    |    |
| <p>(b) 复杂的周期信号</p> <p>条件:</p> <p><math>c = 0</math></p> <p><math>F(t) = F\cos(\omega t)</math></p> <p>结果:</p> <p><math>x(t) = A_1 \cos(\omega_n t) + A_2 \cos(\omega t)</math></p> |    |
| <p>(c) 瞬态信号</p> <p>条件:</p> <p><math>c \neq 0</math></p> <p><math>F(t) = 0</math></p> <p>结果:</p> <p><math>x(t) = A_0 e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t)</math></p>               |    |