

ZHENDONG XINHAO DE
MANGYUAN FENLI JISHU JI YINGYONG



振动信号的 盲源分离技术及应用

李舜酩 著

航空工业出版社



振动信号的盲源分离 技术及应用

李舜酩 著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书把通信信息学科中最具发展前途之一的盲信号源分离理论引用到振动信号处理中,特别是在机械结构振动信号分析与运动机械故障诊断中,第一次全面地介绍盲源分离理论与方法在振动信号中的发展与应用。

本书共分7章,其主要内容包括:第1章介绍机械结构振动的特征、复杂性及其现代信号分析方法;第2章介绍与振动信号分析相关的盲源分离基本概念、基本理论和基本方法;第3章介绍盲分离现代分析方法及应用研究成果;第4章介绍机械振动特征信号的盲分离方法及研究成果;第5章介绍以飞行器发动机、车辆工程、动力工程为主要工程领域的机械振动信号的分离应用研究;第6章介绍所开发的基于VC++与MATLAB混合编程的盲源分离软件平台。

本书可作为具有机械振动理论与应用基础、信号处理理论与方法的大学毕业生、研究生和工程技术人员的学习参考书,也可以作为航空航天类、大机械类、力学类、动力工程类专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

振动信号的盲源分离技术及应用/李舜酩著. --北京:航空工业出版社,2011.3

ISBN 978-7-80243-694-7

I. ①振… II. ①李… III. ①振动-信号处理 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第029875号

振动信号的盲源分离技术及应用

Zhendong Xinhao de Mangyuan Fenli Jishu ji Yingyong

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2011年3月第1版

2011年3月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:13

字数:322千字

印数:1—1500

定价:40.00元

序

当今世界，人们面对的各类系统日趋复杂。这给系统分析和特征提取带来许多新问题。特别是对于非线性系统、非平稳动态信号，仅靠常规方法难以进行分析。

近十几年来，盲源分离作为一种新的理论与方法，在信息科技领域取得长足发展，并且在一些技术上获得成功应用。在复杂动态信号分析方面，国内外学者对盲源分离的理论和方法进行了若干探索，取得了一些进展。然而，笔者尚未见有系统介绍动态信号盲源分离技术与应用的著作。

近年来，李舜酩教授在振动信号的盲源分离技术及其应用方面开展了比较系统和深入的研究，并在其研究基础上撰写成这本著作。该著作从介绍机械振动的复杂性和一些主要分析方法出发，把信息科技领域的盲源分离理论和方法引入到振动信号分析领域。作者首先阐述盲源分离的基本理论，然后对盲源分离现代分析方法进行了发展，并给出了应用结果。作者介绍了若干航空、机械领域的振动特征信号的盲源分离方法和实际技术，并介绍了自行研制的振动信号盲源分离软件平台。

该著作形成了一个比较完善的理论、方法及应用体系，是国内第一本介绍振动信号盲源分离技术与应用的专著，在振动信号的盲源分离技术方法与应用上有若干新进展。该著作在介绍理论和方法的过程中，做到深入浅出；在联系实际方面，力求提供应用实例。尤其是在技术实现上给出了具体步骤，便于从事振动信号处理的科技人员、研究生入门和应用。

我与李舜酩教授相识 20 年，目睹了他长期从事振动信号处理研究的历程，很高兴看到他的新作问世。祝愿李舜酩教授在已有的研究基础上，百尺竿头更进一步，在学术上取得更加重要的成就！

中国科学院院士
中国力学学会理事长



2010 年 12 月 28 日

前 言

机械振动信号的复杂性在于它包含丰富的细节特征信息,人们可以充分利用这些信息为设备的振动监测与故障诊断、优化设计、振动与噪声控制等提供基础条件。但是,目前人们大多在环境条件和响应结果已知的情况下才能较好地估计出源信号。实际条件往往不允许环境条件已知。这样就给源信号的估计,特别是微弱故障源信号或复杂混叠的非平稳源信号的估计造成了很大困难。

随着分析理论的完善、手段的提高,近20年来发展起来的盲源信号分离技术在通信信号处理中取得了长足的发展,并在生物医学等其他应用领域得到应用。近10年来,人们把盲源分离理论技术引用到振动信号分析领域,在机械振动源信号的分离中也受到了广泛的重视。但是,由于机械振动信号的复杂性,其盲源分离的效果往往不尽人意。在复杂振动信号分析方面,国内外学者也从盲源分离的理论上进行了若干探讨,取得了一些成绩,但是还没有系统研究和介绍振动信号的盲源分离技术与应用的成果出现。

我们在机械振动信号的盲源分离方面进行了若干方面的探索,包括盲源分离方法的应用研究、不同类型机械振动信号盲源分离方法的适用性研究与优化选择、对现有盲源分离方法的改进研究、创新研究,以及实际机械结构工作状态下复杂振动信号的分离研究等。这些研究成果中的许多部分已经应用到工程实际中。其他学者在机械振动领域的不同具体方面进行了研究,也取得了若干成果。

为了集中体现我们在机械振动信号盲源分离方面取得的研究成果,并选用他人的若干研究成果,总结完成该书,以飨读者。同时,也期望该书能起到抛砖引玉的作用,使机械设备振动信号的盲源分离研究迈上更高的台阶、驶上更高速发展的“超高速公路”,出现更多、更优秀的新成果。

全书共分7章,其主要内容包括:

第1章介绍信号处理和分析在机械工程振动中的作用、机械结构振动的特性及其描述,分析了实际机械结构振动的复杂性,给出了信号分析方法在机械工程振动中的发展。

第2章给出盲源分离的发展状况及其模型描述方法、盲源分离预处理方法,介绍盲源分离的相关数学知识,并总结给出盲源分离的独立性判据、ICA优化算法,以及分离效果的评价指标。

第3章在介绍几种常用算法的基础上,介绍研究得到的优选方法和改进方法,以及非线性、后向传播神经网络的盲源分离算法,给出仿真结果,并应用到实际转子振动信号盲源分离中。

第4章介绍基于信息论准则的机械振动分析方法,给出研究得到的加速梯度算法和快速算法,以及半盲源分离方法,完成了强噪声环境下航空发动机的实际转子混叠振动信号的分离试验。

第5章针对容易产生复杂振动特征的不同的机械振动信号,根据其特性选取不同的分离方法进行盲源分离,介绍相关的理论方法、试验方案、数据分析技术等,得出有意义的

结论。

第6章从盲源分离模型与处理流程的基础出发,以C++语言联合MATLAB软件混合编写程序,利用在VC++工作平台下的MFC库函数,开发可视化界面操作的振动信号盲源分离软件平台。

第7章对全书进行总结,并进行机械振动信号盲分离技术研究的展望。

机械振动信号盲分离的理论、技术方法不断发展,本书所涉及的只是相对直接和研究热点的部分内容,像带噪声混叠信号的盲分离问题、相关源信号的盲分离问题、非平稳源混叠的盲分离问题、源信号属于线性与非线性的混合信号、如何提高分离精度从而提高机械故障诊断精度等方面的研究还有许多事情要做。本书的目的只是为有一定振动信号处理基础的研究者和工程技术人员提供一个概貌而非全面的,但具有实用价值的研究介绍。

本书的研究内容得到国家自然科学基金项目(编号:50675099)、航空科学基金项目(编号:04I52066)、江苏省基金项目(编号:BK2007197)和某些横向研究项目的支持。在相应的研究中,做出贡献的除作者外,主要还有杨涛工程师(研究生期间完成的工作)、高岳文工程师(研究生期间完成的工作)、阳平工程师(研究生期间完成的工作)、雷衍斌工程师(研究生期间完成的工作)、郝青青工程师(研究生期间完成的工作),范志强博士/研究员、张袁元博士、陈茉莉博士、安木金硕士、刘建娅硕士、刘晓伟硕士、杜建建硕士、汪星星硕士、滕光蓉硕士/工程师等参与了部分研究工作。每个参与研究者的贡献体现在各个章节的内容及参考文献中。

本书的编写选用参考了若干著作、博士学位论文、硕士学位论文和学术刊物上的研究论文。所选用参考的具体内容列出在各个章节的参考文献中。在此表示感谢!

由于作者水平有限,选材和论述中会有若干不当和错误之处,恳请广大读者给予批评指正。

作者

2011年1月9日

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 信号处理和分析在机械工程振动中的作用	(1)
1.1.1 工程中对第一类振动信号的处理方法	(1)
1.1.2 工程中对第二类振动信号的处理方法	(3)
1.1.3 发展趋势	(6)
1.2 机械振动的特性及其描述	(7)
1.2.1 机械振动的一般处理方法	(7)
1.2.2 线性理论模型	(8)
1.2.3 非线性处理的局限性	(9)
1.3 实际机械结构振动的复杂性	(9)
1.3.1 简化的理论方法与工程问题的区别	(9)
1.3.2 一般分析方法及其存在的问题	(10)
1.4 信号分析方法在机械工程振动中的发展	(10)
1.4.1 传统振动信号分析方法	(10)
1.4.2 小波分析方法	(12)
1.4.3 经验模式分解方法	(15)
1.4.4 PCA 方法	(16)
1.4.5 混沌方法	(17)
1.4.6 子带能量法	(18)
1.5 本章小结	(20)
参考文献	(20)
第2章 盲源分离的基本理论	(24)
2.1 盲源分离的发展状况	(24)
2.1.1 独立分量分析	(25)
2.1.2 噪声环境下的盲源分离	(25)
2.1.3 稀疏分量分析	(25)
2.2 盲源分离模型描述	(26)
2.2.1 盲源分离的数学模型	(26)
2.2.2 盲源分离的基本假设	(28)
2.2.3 盲源分离的不确定性	(28)
2.3 盲源分离的预处理方法	(29)
2.3.1 中心化	(29)

2.3.2	白化处理	(30)
2.4	盲源分离的相关数学知识	(31)
2.4.1	概率论知识	(31)
2.4.2	统计知识	(32)
2.4.3	信息论知识	(34)
2.5	盲源分离的独立性判据	(37)
2.5.1	非高斯性极大	(37)
2.5.2	互信息最小	(38)
2.5.3	非线性不相关	(38)
2.6	ICA 优化算法简介	(39)
2.6.1	批处理算法	(39)
2.6.2	自适应算法	(40)
2.6.3	逐层分离法	(41)
2.7	分离效果的评价指标	(41)
2.7.1	PI 评价指标	(41)
2.7.2	相似系数	(42)
2.7.3	二次残差	(42)
2.8	本章小结	(42)
	参考文献	(43)
第3章	盲源分离的现代分析方法	(46)
3.1	振动信号的固定点算法	(46)
3.1.1	基于峭度的固定点算法	(46)
3.1.2	基于负熵的固定点算法	(47)
3.1.3	估计多个独立分量的固定点算法	(47)
3.1.4	基于极大似然的固定点算法	(48)
3.2	JADE 算法	(49)
3.2.1	四阶累积量矩阵	(49)
3.2.2	累积量矩阵的联合近似对角化	(50)
3.2.3	振动信号的仿真分析	(50)
3.3	基于二阶统计量的盲算法	(51)
3.3.1	稳健的二阶盲辨识算法	(51)
3.3.2	TDSEP 算法	(52)
3.3.3	二阶非平稳源盲分离算法	(53)
3.3.4	转子振动信号的二阶非平稳源盲分离	(54)
3.4	基于 Jacobi 优化的盲源分离方法	(58)
3.4.1	基于 Jacobi 优化的极大似然估计方法	(58)
3.4.2	改进的基于 Jacobi 优化的极大似然估计方法	(61)
3.4.3	仿真与试验研究	(62)

3.5 稀疏分量分析	(64)
3.5.1 基于信号稀疏表示的线性混叠信号盲分离原理及算法	(65)
3.5.2 基于粒子群优化算法的稀疏信号盲分离	(66)
3.5.3 仿真分析	(67)
3.6 含有噪声的独立分量分析	(68)
3.6.1 基于小波变换的消噪方法	(68)
3.6.2 基于现代时间序列分析的滤波方法	(70)
3.6.3 试验研究	(72)
3.7 非线性盲源信号分离	(75)
3.7.1 非线性去混叠系统	(75)
3.7.2 基于后非线性的盲源分离	(76)
3.7.3 仿真试验	(78)
3.8 基于 BP 神经网络的非线性盲源分离	(80)
3.8.1 MISEP 方法理论基础	(80)
3.8.2 多层感知器的 ψ 函数约束	(81)
3.8.3 BP 神经网络的训练	(81)
3.8.4 仿真与试验研究	(83)
3.9 本章小结	(88)
参考文献	(88)
第 4 章 机械振动特征信号的盲分离方法	(92)
4.1 基于信息论准则的独立分量分析方法	(92)
4.1.1 信息最大化准则及其算法	(92)
4.1.2 最大似然准则及其算法	(94)
4.1.3 最小互信息准则及其算法	(95)
4.1.4 估计分离矩阵的加速梯度法及其应用	(96)
4.2 基于非高斯化的独立成分分析方法	(98)
4.2.1 基于峭度的快速定点算法	(98)
4.2.3 基于负熵的快速定点算法	(99)
4.2.3 基于峭度的仿真分析与试验研究	(100)
4.2.4 基于负熵的仿真分析与试验研究	(104)
4.3 机械振动信号的卷积混合盲分离	(109)
4.3.1 卷积混合矩阵的时域盲分离	(109)
4.3.2 卷积混合矩阵的频域盲分离	(112)
4.3.3 应用研究	(113)
4.4 基于机械振动特性的半盲分离方法	(118)
4.4.1 带有参考信号的盲源分离方法	(119)
4.4.2 相似性度量与参考信号模型的建立	(121)
4.4.3 仿真算例与试验分析	(123)

4.5	振动信号盲分离的新方法	(126)
4.5.1	盲分离的组合对比函数	(127)
4.5.2	基于组合对比函数的转子混叠振动信号盲分离	(128)
4.5.3	自相关降噪原理	(130)
4.5.4	噪声环境下的转子振动信号分离	(131)
4.6	本章小结	(138)
	参考文献	(138)
第5章	机械振动信号的分离研究	(142)
5.1	电机振动信号的分离	(142)
5.1.1	同一试验台上两台调速电机振动信号的分离	(142)
5.1.2	两台低功率电机振声信号的分离	(143)
5.2	转子试验台振动试验混叠信号的分离研究	(147)
5.2.1	试验方法、所用仪器及试验过程	(147)
5.2.2	试验数据分析	(148)
5.3	航空发动机振动信号分析	(151)
5.3.1	航空发动机试车试验振动分析	(151)
5.3.2	航空发动机试车故障分析	(154)
5.3.3	某型涡扇发动机转子振动超标故障诊断	(157)
5.3.4	双转子航空发动机振动信号的分离	(160)
5.4	驾驶舱内混叠声音信号的分离	(163)
5.4.1	人工混合声信号的盲源分离	(163)
5.4.2	发动机噪声背景下舱内多路声信号的盲分离	(167)
5.4.3	噪声环境中舱内混叠声信号盲分离	(169)
5.5	内燃机振动信号的盲分离	(171)
5.5.1	盲去卷积的 MBLMS 算法	(171)
5.5.2	分离试验数据分析	(173)
5.6	齿轮箱振动信号的盲分离	(175)
5.6.1	齿轮箱振动信号的建模	(175)
5.6.2	基于联合近似对角化的齿轮箱故障盲源分离	(176)
5.7	盲分离技术在模态分析中的应用	(177)
5.7.1	基于快速独立分量分析的模态振型识别	(177)
5.7.2	试验研究	(178)
5.8	本章小结	(181)
	参考文献	(181)
第6章	振动信号盲源分离软件平台开发	(183)
6.1	混合编程简介	(183)
6.1.1	VC++与MATLAB混合编程方法	(183)

6.1.2	MATCOM 的应用	(184)
6.2	软件平台的框架结构	(186)
6.3	振动信号软件平台的处理流程及其功能设计	(186)
6.3.1	信号的加载与编辑模块	(187)
6.3.2	信号的混合模块	(188)
6.3.3	算法选择模块	(188)
6.3.4	分析结果的图形显示与存储模块	(189)
6.4	本章小结	(191)
第 7 章	总结与展望	(192)
7.1	全书总结	(192)
7.2	工作展望	(193)

第1章 绪 论

在运动机械结构,像航空航天器(特别是发动机)和车辆运动结构的正常运转、试车运行及检修过程中,振动信号是必须检测的项目之一。近几年来,我国在振动信号处理与分析的方法研究中取得了许多重大进展。但是,振动信号的复杂性一直是困扰技术人员的难题。若干振动特征不能得到正确或充分的解释。特别是微弱故障信号与其他动态信号以及噪声混叠在一起,振动源信号的确切部位和大小的识别与分析技术难题阻碍着研究的进一步发展。因此,运动机械的振动信号,特别是复杂的非平稳微弱振动信号的监测、提取与准确地识别及其控制的理论方法和关键技术的研究,已经受到许多行业相关研究人员的广泛重视,并开展了多方面的探讨。

1.1 信号处理和分析在机械工程振动中的作用

对机械工程振动信号的分析,是工程中进行故障诊断、工作质量评价、健康监测、参数检测的必要手段^[1-1]。通过对传感器采集到的振动信号进行适当的分析,可以降低噪声的影响,提高信噪比,获得所提取信号的准确量值,得到其准确的特征,以发现测试对象的本质特点。采用适当的、先进的信号处理原理,可以改善传统测试仪器的性能,并有可能由此研制出全新的分析仪器。因而,振动信号的分析与处理,在机械工程中显得尤为重要,一直是机械工程界研究的一个热门课题。

就目前国内外应用于机械工程振动中的数字信号处理比较常用的方法,大致可以分为两类^[1-2]:第一类是对稳态或准稳态信号(也就是广义平稳信号,以下统称平稳信号)的处理方法;第二类是对非平稳信号的处理方法。本节对这两类方法进行简单介绍,同时对它们各自的特点和应用特点进行对比,指出其优、缺点,在机械工程中的应用以及发展前景,并提出一些在机械工程振动信号处理中大有发展前景的信号处理方法。

1.1.1 工程中对第一类振动信号的处理方法

(1) 离散频谱分析

离散频谱分析是振动信号处理中广泛采用的一种分析方法。1965年Cooley-Tukey提出的快速傅里叶(Fourier)变换(FFT)是信号分析上的一个大转折^[1-3]。FFT是数字信号分析的基础,在工程技术的各个领域得到了广泛的应用。

对振动信号的离散频谱分析,主要集中在提高其精度的研究上。研究水平基本停留在对单频率信号和频率间隔较大的多频率信号的离散频谱校正方法进行探讨,而对密集频率和连续频率成分信号高斯频谱的误差分析和校正方法的研究很少。实际工程中的很多振动信号是包含着密集频率成分的,对此类振动信号进行离散频谱误差分析与对频率间隔较大的振动信号的分析间存在较大的差异,校正方法也完全不同,并且对其校正的难度也较大,因此,如何准确识别这类振动信号并有效校正和分析其误差,是工程界急需解决的难题之一。这个问题的解决,将使离散傅里叶变换和频谱分析技术在工程实际中得到更广泛的应用。

机械工程中离散频谱的校正方法,大致可分成四类^[1-4]:①比值校正法(又称内插法)^[1-5];②能量重心校正法^[1-6];③FFT+细化傅里叶变换(DFT)谱连续DFT分析方法^[1-7];④相位差法^[1-8]。这几种处理方法都能解决单频率或间隔较大的多频率信号,但不能用于对频率过于密集和连续谱的校正,对频率过于密集和连续谱的校正需要更深入的研究。

(2) 细化选带频谱分析

在机械振动信号分析中,往往会遇到密集型频谱的信号,要求在较高的某一频率附近,能有足够高的频率分辨率。为了识别这类谱图的细微结构,必须要求振动信号分析系统既要有高的频率分辨率,又要有较宽的频率范围。对这类振动信号分析最为有效的方法是复调制细化谱分析方法。它是基于复调制移频的高分辨率 Fourier 分析法,一般简称为 ZOOMFFT 方法。这种方法的缺点是:①中间数据的存放需要很大的内存空间;②由于使用了低通滤波器,它将带来分析频带两端谱线的幅值误差,并且细化倍数越大,误差越大。这些缺点使得最大细化倍数和分析精度都受到了很大的限制。就此,有学者提出了复解析带通滤波器的概念,以及基于该滤波器的细化选带频谱分析的方法^[1-9]。

(3) 解调分析

解调分析经常使用在机械工程中的故障诊断,破坏原因分析等机械工程问题。采集到的振动信号,往往是调制信号。

机械工程中传统的解调分析的方法大致有:希尔伯特(Hilbert)变换、高通绝对值分析、检波滤波和平方解调等方法。由于高通绝对值分析、检波滤波和平方解调的解调原理基本相同,故而又将它们合称为广义检波滤波。但它们都不能很好地克服健康监测中解调分析存在的局限性:①将不包括调制信息的两个时域相加信号以其频率之差作为解调信号解出,会在解调谱上出现无法分析或引起误诊断的频率成分;②在检波过程中,载波频率有可能出现高次谐波而产生混频效应,从而在解调谱上出现无法分析的频率成分;③由于无法在细化分析选抽时进行数字低通滤波,所以有可能出现调制频率高次谐波成分发生频率混叠而反折回低频部分的现象。这样有学者提出了基于它们的优化算法:基于复解析带通滤波器的优化 Hilbert 变换解调分析^[1-10]和复解析带通滤波器的细化解调/频谱分析集成算法^[1-11]。它们能够提高解调分析的性能,但仍然不能完全克服解调分析存在的三种局限性。所以解调分析的理论与方法还有待进一步发展。

(4) 基于高阶统计量的振动信号分析

高阶统计量是高阶累积量和高阶谱的统称。是相对于二阶统计量(相关函数与功率谱)而言的。用高阶统计量处理机械工程中的振动信号主要是应用高阶谱分析^[1-12]。

高阶谱又称多谱或累积量谱。机械工程中振动信号的处理,一般用三阶谱(又称双

谱)和四阶谱(又称三谱)。在振动信号处理中,高阶谱具有许多很好的性质。因为其优点,高阶谱在抗噪语音编码、机械故障诊断、特征提取等方面得到了应用。

高阶谱存在一个比较严重的缺点,那就是它一般只适合观测数据很长的场合,若观测数据较短时,高阶谱就不适用于处理提取到的振动信号了。

(5) 分形特征分析

其组成部分以某种方式与整体相似的形体叫分形。对于简单缓变信号,很难体现这种自相似性;但是对于复杂的、动态测试信号,如多种频率成分共存的振动信号,就可能呈现出自相似性,从而可以用分形理论中的分形特征来分析^[1-13]。

利用分形特征来分析机械工程中的振动信号,能反映出振动的不规则性和复杂性,而分维数为定量描述这种复杂程度提供了非常简洁而实用的指标。在众多分维数中,盒维数^[1-14]以其计算简单、概念清晰、直观等优点而在机械工程的振动信号处理中得到了应用。

分形特征也广泛应用于处理机械工程中的非平稳振动信号,如离散振动信号的分形盒维数,它能够定量地评价振动信号的复杂性和不规则性,为机械设备的非平稳信号分析和故障诊断提供一种新的无量纲指标。

与其他信号处理方法相比,分形分析的特点是:①波动曲线的幅度缩放,不影响其盒维数,故而分形分析不受传感器增益的影响;②计算机分析谱图识别是件很困难的事情,然而盒维数的整数计算盒对比是很方便的;③分形分析的盒维数作为一种斜率,不能反映出细节,也没有像功率谱那样直观的物理意义。

1.1.2 工程中对第二类振动信号的处理方法

振动信号处理的传统方法是进行统计信号处理,有三个基本假设:线性性、高斯性和平稳性,而现代振动信号处理则多以非线性性、非高斯性和非平稳性作为分析与处理的对象,更符合工程实际。

傅里叶分析在振动信号的处理中发挥了极大的作用。但由于傅里叶分析使用的是一种全局的变换,因此它不能表达振动信号的时-频局域性质,而这些性质往往是非平稳信号最根本和最关键的性质。为了对非平稳振动信号的分析 and 处理,人们对傅里叶分析进行了推广并进行了一系列革命性的改变,提出并发展了一系列的振动信号分析理论。

(1) 短时傅里叶分析

信号的短时傅里叶分析的基本思想是从不同时刻局部的频谱差异上来刻画信号的时变特性。它的主要优点是:若信号在给定的时间间隔和频率间隔内具有大多数的能量,则其短时傅里叶变换(STFT)将局域化于某一区域内,而在信号没有多少能量的时间和频率间隔处,其STFT近似为零。

短时傅里叶分析的主要缺陷在于:由于它使用单一的窗函数,故而对应于一定的时刻,只是对其附近窗口内的信号作分析,若选择的窗函数窄(即时间分辨率高),则频率分辨率低;但是提高时间分辨率使窗函数变宽,广义平稳信号的近似程度就会降低^[1-15]。STFT不是一种动态的分析方法,因此它适用于信号分辨率较为稳定的信号,在生物医学、工程光学、振动信号测试分析等领域得到了应用。

(2) 分数阶傅里叶变换

将振动信号 $x(t)$ 旋转 $\pi/2$ 的非整数倍数角度的线性变换称为分数阶傅里叶变换^[1-16]。作为傅里叶变换的一种广义形式,傅里叶变换的分数幂理论最早是 Namias 于 1980 年建立的,并将其称为分数阶傅里叶变换 (FIFT); 后来,有关学者对分数阶傅里叶变换做了数学上更加严格的定义^[1-17],使得后来它在机械工程振动信号处理中得到了应用。

分数阶傅里叶变换的一个非常重要的性质是:一些原本在时-频平面存在耦合的问题,经过合适角度旋转得到的分数阶傅里叶域,可以变成无耦合的信号处理问题。它与 Wigner-Ville 分布、STFT、谱图间存在密切的关系。

信号的时-频分布 (Cohen 类) 是双线性的,因此不可避免地存在多信号分量间交叉项,如果能适当地选择分数阶傅里叶变换的阶次,使得交叉项的分布与分数阶傅里叶变换后的坐标轴基本平行,通过适当地选择具有带阻特性的窗函数参数,可以有效地滤除这些交叉项。和 STFT 变换一样,可以对分数阶傅里叶变换进行加窗处理^[1-18],用这种方法来分析具有线调频特性的信号时,能够得到更集中、有效的时-频信号分解。

分数阶傅里叶变换已经在光学信号处理、扫描频率滤波器、时变滤波和多路传输,以及人工神经网络等中得到了不少应用。

(3) 小波分析

小波 (Wavelet) 是在 STFT 的基础上发展起来的一种新的变换方法,其基本思想是:将频率域的表示改为用另外一个域的表示 (如尺度域),而用联合的时间域和尺度平面来描述信号^[1-16]。小波分析方法是一种窗口大小 (即窗口面积) 固定但其形状可改变、时间窗和频率窗都可改变的时-频局部分分析方法。在大尺度下,可以将信号的低频信息 (全局) 表现出来;在小尺度下,可以将信号的高频 (局部) 特征反映出来。

小波分析能有效地从信号中提取瞬态突变信息,通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度 (或多分辨) 细化分析,解决了傅里叶变换不能解决的许多困难问题。因此小波分析在工程信号的处理中得到了广泛的应用,并且取得了很好的效果。

小波分析在工程信号的处理中,也存在着一些不足:①对信号的奇异点,小波变换非常敏感,能对奇异信号的突变点给予准确的定位,但难以判断哪些突变点是感兴趣的点;②选取合适的时域和频域分辨率在工程中没有得到很好的解决;③小波分析缺乏有效的快速算法;④小波变换中小波函数的选择与谱分析中窗函数的选择一样,需要根据不同应用问题来具体考虑。

(4) 线调频小波变换

线调频小波是小波的重要推广。线调频小波变换使用的时-频分析网格除了时移、频移、尺度变化以外,最主要的是包含了时-频网格在时-频平面上的放置以及在倾斜方向上的尺度变化 (拉伸)。由于使用各种长方形和各种平行四边形的时-频网格,所以线调频小波变换可以分析具有非固定不变带宽和非固定比例带宽的非平稳信号,对噪声和信号频率混叠现象的消噪分离也更有效。它在振动信号识别、齿轮故障诊断等实际中已经得到应用。

线调频小波基包含了傅里叶变换基函数、STFT 变换基函数及小波变换基函数,因而三种变换都可以看作是线调频小波变换特例。线调频小波变换提供了几种新的信号表示方法,在很多信号处理问题中的应用是其他信号处理方法所无法替代的。但是它也存在一些缺陷:它的高维空间结构使得对它的计算、数据的存储以及显示都很不方便。因此线调频小波变换的理论 with 算法的完善、提高将是小波分析研究的一个重要方向。同时,应用软件

的开发也是线性调频小波一个重要发展方面。

(5) Wigner - Ville 分布

信号 $x(t)$ 的 Wigner - Ville 分布的重要特点之一是：它可以看作是信号能量在时域和频域中的分布，因而使得它具有明确的物理意义^[1-16]。

Wigner - Ville 分布具有许多优良的性能：不用选择窗函数，对瞬时频率和群延时有清晰的概念，对单分量线调频信号具有比其他时-频分布更好的时-频聚焦性。但对于多分量信号，Wigner - Ville 分布的交叉项会产生干扰信号。存在交叉项干扰是这种方法的主要缺陷。由于交叉项与时-频分布与有限支撑特性密切相关，故而对交叉项的抑制主要是通过核函数的设计来实现的。为达到对交叉项的抑制，人们提出了对 Wigner - Ville 分布的众多改型。但是当信号中含有较多的频率成分或者其频率成分靠得很近时，Wigner - Ville 分布所产生的交叉项仍然没有得到很好的解决，解决交叉项问题将是这种处理方法需要深入研究的一个课题。

(6) Hilbert - Huang 变换

Hilbert - Huang 变换是近年来发展起来的一种新的时间序列信号分析方法。其核心是经验模态分解 (EMD)，把复杂的信号分解成若干个本征模态函数 (IMF)；再对 IMF 进行 Hilbert 变换，得到每一个 IMF 随时间变化的瞬时频率和振幅，最后得到振幅-频率-时间的三维谱分布。

Hilbert - Huang 变换的 IMF 必须满足两个条件^[1-19]：①在整个数据列中，极值点的数目和过零点的数目必须相等或至多相差一个；②在任意点，由局部极大点和极小点确定的两条包络的平均值为零。

与频谱分析方法 FFT 相比，Hilbert - Huang 变换得到的每个 IMF 的振幅和频率是随时间变化的，消除了为反映非线性、非平稳过程而引入的简谐波，从而可用于非线性和非平稳过程分析^[1-20]。与小波分析方法相比，Hilbert - Huang 变换具有小波分析的全部优点，在分辨率上消除了小波分析的模糊和不清晰，具有更准确的谱结构，因而 Hilbert - Huang 变换在分析非线性、非平稳过程中具有很高的应用价值。

Hilbert - Huang 变换的上、下包络是由信号的局部极大值和极小值通过样条插值算法给出。这种算法在分析中会带来误差，特别是当各个频率分量靠得很近时，误差就更大了。减小在 Hilbert - Huang 变换中的误差，是以后研究中应当解决的一个问题。

(7) 循环平稳信号分析

相关函数随时间呈周期或多周期（各周期不能通约）变化的信号称为循环平稳或周期平稳 (Cyclostationary) 信号。根据特征参数的不同，可进一步分为一阶（均值）、二阶（相关函数）、高阶（高阶累积量）循环平稳信号。

循环平稳信号分析的最终目的是得到信号和系统的时变特性。它与一般的非平稳信号的区别在于信号统计量变化的周期性是其重要的特征。对循环平稳信号主要是利用循环统计量（高阶循环累积量和循环自相关函数）进行分析。

循环平稳信号是一类非常重要的非平稳信号，它在通信、雷达、系统控制、机械故障诊断等工程领域已经得到应用，并具有广泛的应用前景。

(8) 盲源信号分离

盲源分离 (BSS) 是指在不知源信号和传输通道的参数的情况下，根据输入源信号的

统计特性, 仅由观测信号来恢复源信号的各个独立成分的过程^[1-21]。现在所指的盲源信号分离通常是对观测到的源信号的线性瞬时混合信号进行分离^[1-22]。

现在, 盲源分离已经应用于通信、生物医学、语音辨识等领域, 并取得了很好的效果。盲源分离方法在机械振动信号分析与故障诊断中也有所应用, 但还没有成为一门很成熟的技术。实际工程中信号有时不能很好地满足盲源分离的假设, 可能会给盲源分离带来很大的误差。目前, 国内外主要的研究是探讨其各种不同的分离手段和对信号分离的算法, 以及工程应用。盲源分离是一种很有前途的新的工程信号处理技术。

1.1.3 发展趋势

通过对机械工程中常用的平稳和非平稳振动信号分析方法的原理、特点及其应用的论述, 可以发现, 在解决具体问题时, 要根据所得到的振动信号参数, 选择适当的信号分析方法。

近年来, 信号处理方法得到了很大的发展, 并逐渐形成了系统化的理论, 由此也出现了越来越多的信号处理工具, 解决了许多工程实际问题。随着信号处理精度不断提高的要求, 对微弱信号的检测、识别、分析与处理在机械工程振动信号处理中越来越受到人们的关注^[1-23]。

如何提高机械工程中振动信号处理的精度及其在计算机中的运算速度, 从而使得信号处理方法在机械工程中得到更好的应用, 仍将是在以后的工作中需要深入探讨的一个课题。

具体到各个信号处理的理论方法来分析, 如下几个方面具有明确的发展趋势:

①对密集频率和连续频率成分进行频谱分析, 准确识别这类振动信号并有效校正和分析其误差, 是机械工程中振动信号处理应用发展的重要方面。

②从研究情况来看, 采用复解析带通滤波器进行选带细化谱分析, 有可能完全取代传统的复调制细化谱分析方法。该方法为频谱密集型的振动信号分析理论的完善和应用方法的研究, 提供了进一步的发展空间。

③解调分析理论与方法的研究还有待进一步发展。在克服前述的三个局限性后, 将对相关机械工程结构的故障检测与诊断具有十分重要的作用。

④目前分形分析在机械工程上还没有真正形成系统的方法, 主要还是定性分析。结合其他定量分析的方法能更好地描述机械工程信息的细节。分形的信号处理方法与理论的系统研究, 是一个十分有优势的发展方向。

⑤为减少旁瓣泄漏, 窗函数的优选与新窗函数的设计, 是短时傅里叶变换的重要发展方向。当窗函数能够设计的在不同频段可以宽窄任意改变, 则这种窗函数也可以适用于非平稳振动信号的分析处理。

⑥小波分析的研究及应用取得很大的成绩, 尤其在我国, 这体现了小波分析的巨大优势。但在发展过程中也暴露出如前所述的若干弊端。从理论与方法上克服这些弊端, 并完善应用技术是小波分析的发展趋势。

⑦线调频小波变换还有待于进一步发展和完善, 从而达到理论与算法的系统化。

⑧Wigner - Ville 分布和 Hilbert - Huang 变换的发展, 一方面是理论与方法的完善, 解