

基于时间序列标度分析的 直升机齿轮箱故障诊断

IYU SHIJIAN XULIE BIAODU FENXI DE
ZHISHENGJI CHILUNXIANG GUZHANG ZHENDUAN

林近山 著



科学出版社

基于时间序列标度分析的直升机 齿轮箱故障诊断

林近山 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书研究了齿轮和滚动轴承振动信号的标度转折特性,提出了基于时间序列多标度指数特征的机械故障特征提取方法;研究了齿轮和滚动轴承振动信号的多重分形特征,提出了基于多重分形去趋势波动分析方法和马氏距离判别法的机械故障诊断方法;研究了齿轮和滚动轴承振动信号增量序列的标度特征,发现了一种有趣的“故障线”现象,阐述了该现象的成因,提出了一种新的旋转机械状态评估准则;利用仿真数据和实验数据对所提出理论方法的性能进行了验证。

本书可供高等院校从事机械、能源动力、航空和船舶专业的教师、研究生和高年级本科生阅读,也可供从事信号处理、机械设备状态监测与故障诊断、设备管理与维护等工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于时间序列标度分析的直升机齿轮箱故障诊断/林近山著. —北京:科学出版社, 2016.9

ISBN 978-7-03-046022-6

I. ①基… II. ①林… III. ①直升机-齿轮箱-故障诊断 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 208033 号

责任编辑:王艳丽/责任校对:贾娜娜
责任印制:谭宏宇/封面设计:殷 靛

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

江苏凤凰数码印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 9 1/4 插页: 1

字数: 188 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

传统的机械故障诊断方法虽然在旋转机械故障诊断方面发挥了重要作用，但是这些方法都存在一些缺陷，这些缺陷限制了它们在实际应用中的效果。因此，有必要提出新的方法来进一步丰富机械故障诊断方法的理论体系，提高机械故障诊断技术的水平，本书正是在这样的背景下完成的。

直升机齿轮箱属于旋转机械的范畴。旋转机械是非常复杂的动力学系统，当其出现故障时，组成该动力系统的各部分之间的相互作用被加强，其内在表现是动力学行为往往表现出非线性和复杂性，外在表现是振动信号不但呈现出非平稳性，而且常常伴随复杂的自相似性，表现出混沌和分形等复杂的非线性特征。如果能够客观地量化复杂机械故障信号的复杂性，就能够有效地提取它们的故障特征，从而有效地对机械故障进行诊断。复杂系统在动力演化的过程中由于涨落可能会形成复杂的标度行为。标度行为是一类复杂的动力学行为，表现为系统的若干宏观指标或者某个变量的分布函数呈现标度律行为，是复杂系统动力学行为的表现形式。本书在总结现有机械故障诊断方法优缺点的基础上，采用统计物理学上的标度分析方法来研究复杂机械故障信号的波动状况，量化复杂动力系统的标度行为，并以此作为复杂机械系统的故障特征，提出了基于时间序列标度分析的旋转机械故障诊断方法。本书从一个新的角度来研究机械故障诊断问题，具有鲜明的学科交叉特色。

全书共分 6 章。第 1 章综述了直升机齿轮箱及旋转机械故障诊断技术的研究意义和国内外研究现状；第 2 章阐述复杂系统的标度行为，介绍了几种解释复杂系统标度行为的动力学机制；第 3 章采用去趋势波动分析研究机械振动信号的波动行为，提出了基于时间序列多标度指数特征的机械故障特征提取方法；第 4 章研究了旋转机械振动信号增量序列的标度特征，提出了“故障线”的概念，探讨

了“故障线”的成因,并以此为基础提出了一种新的旋转机械状态评估准则;第5章采用多重分形去趋势波动分析研究机械振动信号的波动行为,提出了基于时间序列多重分形特征的齿轮箱故障特征提取方法;第6章提出了基于多重分形去趋势波动分析方法和马氏距离判别法的滚动轴承故障诊断方法。

本书系由作者的博士学位论文经加工修订和内容扩充而成。在书稿准备过程中,窦春红老师做了大量的工作,在此深表感谢。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中不妥之处在所难免,诚恳欢迎广大读者和各位同仁批评指正。

作者

2016年1月

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 直升机齿轮箱故障诊断技术的研究意义和研究现状	1
1.1.1 研究意义	1
1.1.2 研究现状	1
1.2 机械故障诊断技术的研究意义和研究现状	3
1.2.1 研究意义	3
1.2.2 研究现状	5
1.3 基于信号分析和处理技术的机械故障诊断方法	6
1.3.1 短时傅里叶变换	7
1.3.2 Winger-Ville 分布	7
1.3.3 小波变换	8
1.3.4 经验模式分解	8
1.3.5 局部均值分解	9
1.3.6 盲源分离	9
1.3.7 循环平稳信号分析	10
1.4 基于模型的机械故障诊断方法	11
1.4.1 时间序列模型	11
1.4.2 隐 Markov 模型	11
1.4.3 协整理论模型	12
1.5 基于人工智能的机械故障诊断方法	12
1.5.1 神经网络	12
1.5.2 专家系统	13

基于时间序列标度分析的直升机齿轮箱故障诊断

1.5.3	模糊理论	13
1.5.4	粗糙集理论	14
1.5.5	支持向量机	14
1.6	基于非线性理论的机械故障诊断方法	15
1.6.1	随机共振	15
1.6.2	流形	16
1.6.3	混沌和分形	17
1.6.4	去趋势波动分析	17
第2章	复杂系统的标度行为及其动力学机制	19
2.1	复杂系统的标度行为	19
2.2	复杂标度行为的动力学机制	20
2.2.1	Barabási-Albert 模型	20
2.2.2	自组织临界理论	21
2.2.3	高度最优化容限理论	22
2.3	分形	23
2.3.1	分形的定义	23
2.3.2	分形产生的物理机制	24
2.3.3	复杂系统的自相似性和标度不变性	25
2.3.4	分形维数	25
2.3.5	多重分形	26
2.4	传统的标度分析方法	28
2.4.1	相关函数分析法	28
2.4.2	功率谱密度分析法	28
2.4.3	重标极差分析法	29
2.4.4	小波变换和经验模式分解分析法	30
第3章	基于时间序列多标度指数特征的机械故障特征提取	31
3.1	去趋势波动分析	32
3.1.1	去趋势波动分析方法	32
3.1.2	标度指数的物理意义	33
3.2	基于时间序列多标度指数特征的机械故障特征提取方法	34
3.3	实验验证	34
3.3.1	齿轮箱故障诊断	34
3.3.2	滚动轴承故障诊断	43
3.3.3	滚动轴承损伤程度识别	48

第 4 章 基于增量序列标度特征的机械故障诊断	55
4.1 增量序列的动力学特征	56
4.1.1 增量序列与原序列的波动特征之间的关系	56
4.1.2 数据的重排和替代	57
4.1.3 增量序列的符号分量和幅值分量及其动力学特征	58
4.2 基于增量序列标度特征的机械故障诊断方法	61
4.3 实验验证	62
4.3.1 齿轮箱故障诊断及其“故障线”	62
4.3.2 滚动轴承故障诊断及其“故障线”	69
4.4 “故障线”现象及其成因研究	72
第 5 章 基于时间序列多重分形特征的齿轮箱故障特征提取	81
5.1 多重分形去趋势波动分析	82
5.1.1 多重分形去趋势波动分析方法	82
5.1.2 多重分形去趋势波动分析方法与经典多重分形理论的关系	83
5.1.3 时间序列多重分形类型的确定方法	85
5.2 基于时间序列多重分形特征的齿轮箱故障特征提取方法	86
5.3 实验验证	86
5.4 齿轮箱振动数据出现多重分形的原因	98
第 6 章 基于多重分形去趋势波动分析方法和马氏距离判别法的滚动轴承故障诊断	102
6.1 基于多重分形去趋势波动分析方法和马氏距离判别法的滚动轴承故障诊断方法	103
6.1.1 马氏距离判别法	103
6.1.2 基于多重分形去趋势波动分析方法和马氏距离判别法的机械故障诊断方法	104
6.2 实验验证	105
6.3 滚动轴承振动数据出现多重分形的原因	116
6.4 多重分形去趋势波动分析方法与其他故障特征提取方法的比较	119
6.5 马氏距离判别法和神经网络在轴承故障特征分类中的性能比较	124
参考文献	125
彩图	

第 1 章

绪 论

1.1 直升机齿轮箱故障诊断技术的研究意义和研究现状

1.1.1 研究意义

直升机是一类能够适应恶劣环境条件的低空飞行工具，可以灵活做出诸如前后左右自由飞行、垂直起降和空中悬停等动作，且无需机场跑道，这些特点使其在军用和民用方面具有广阔的用途及发展前景^[1]。直升机旋翼一般由涡轮轴发动机或活塞式发动机通过由传动轴及减速器等组成的机械传动系统来驱动，直升机的传动系统由主齿轮箱减速器、中齿轮箱减速器、尾齿轮箱减速器和传动轴组成，因此齿轮箱减速器是直升机的重要部件^[1]。由于直升机具有独特的紧凑结构，直升机的传动链没有冗余备份，因此作为传动链重要组成部分的齿轮箱一旦出现故障往往会引起动力传动系统的失控。据统计，军用和民用直升机的事故率大约是固定翼飞机故障率的 2.5 倍，而直升机所出现的最危险的故障之一就是主齿轮箱故障，这种故障通常会导致灾难性的坠毁事故^[2]，因此加强对直升机齿轮箱状态监测与故障诊断技术的研究具有重要的意义。

1.1.2 研究现状

由于振动信号容易获取，且科学界近年来在非平稳非线性信号处理方面取得了令人瞩目的成绩，目前国内外学者在基于振动信号处理的直升机齿轮箱故障诊断方面开展了许多研究。

国外方面，美国马里兰大学的研究人员提出了一种基于故障机理的故障预测和寿命估计方法^[3]；美国宾夕法尼亚州立大学的研究人员提出了一种基于随机故障物

基于时间序列标度分析的直升机齿轮箱故障诊断

理模型、相关系统或部件级监测数据以及各种监视结果融合的故障预测增强方法^[4]；美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）的研究人员提出了一种基于三维加速度数据分析的直升机齿轮箱振动监测方法^[5]，研究了监测参数 FM4 随 OH58 型直升机状态的变化而变化的规律^[6]，设计了一套集成化的机载直升机传动系统故障诊断和预测系统^[7]；美国军方通过实验对振动监测技术在直升机斜盘轴承故障诊断中的效果进行了研究，结果表明该技术能够检测到腐蚀、点蚀和剥落故障，但是不能检测到保持架故障^[8]；美国宾夕法尼亚州立大学的研究人员采用时域同步平均算法研究了 UH-60A 黑鹰直升机行星轮保持架裂纹故障的特征^[9]；澳大利亚国防部门提出了两种检测 UH-60A 黑鹰直升机主减速器行星轮保持架疲劳裂纹故障的方法^[10]；美国佐治亚理工学院的研究人员研究了 UH-60A 黑鹰直升机主减速器行星轮保持架故障特征的选择和提取问题^[11]，研究了基于振动数据分析的直升机行星齿轮故障诊断技术^[12]，提出了一种针对非线性非高斯系统的在线粒子滤波算法，将该方法用于直升机行星轮保持架故障诊断获得了良好的效果^[13]，提出了一种基于盲解卷积算法的去噪方案，该方案利用频域振动模型以及迭代优化策略来达到去噪的目的，将该方法用于直升机齿轮箱振动监测获得了良好的效果^[14]；美国军方部门分析了 UH-60A 黑鹰直升机主减速器行星轮保持架的故障特征^[15]，提出了一种检测 AH-64D Apache 直升机主减速器附件部分严重故障的方法^[16]；希腊塞萨斯德谟克里特大学的研究人员利用时域同步平均算法研究了美国军方直升机行星齿轮保持架的振动信号分析和特征提取问题^[17]；法国研究人员利用 S 函数和模糊逻辑算法来分析状态监测参数的变化趋势^[18]；美国冲击技术公司的研究人员提出了一种基于盲解卷积、特征提取、故障预测和振动模型的集成化去噪算法，该方法利用基于迭代优化策略的盲解卷积算法来提纯信号^[19]；美国西北太平洋国家实验室的研究人员采用 Goertzel 算法评估直升机振动对 Hellfire II 型导弹健康状况的影响^[20]；美国辛辛那提大学的研究人员提出了一种基于鲁棒回归曲线拟合算法的直升机滚动轴承故障预测方案^[21]；英国哈德斯菲尔德大学的研究人员针对直升机齿轮箱的故障诊断问题提出了一种基于自适应线性增强器的两步故障特征增强方案^[22]；埃及法尤姆大学的研究人员提出了一种基于交叉双谱的二次非线性耦合算法用以监测 AH-64D 直升机尾翼驱动轴的工作状态^[23]；美国南卡罗来纳大学的研究人员采用双谱分析算法评估 AH-64D 直升机尾翼旋转部件的工作状态^[24]。

国内方面，上海交通大学的研究人员将隐半 Markov 模型用于 UH-60A 黑鹰直升机主传动行星齿轮架的故障分类^[25]；南京理工大学的研究人员采用小波包分解和小波神经网络相结合的方法来监测直升机主减速器的工作状态^[26, 27]，提出了一种基于离

散小波变换、Kalman 滤波和 Elman 神经网络相结合的直升机主减速器故障预测方法^[28]；中国直升机设计研究所的研究人员分析了维修保障技术对直升机使用的影响^[29]；北京航天测控公司的研究人员在分析转子故障机理和故障模式的基础上提高了直升机转子系统故障检测的精度^[30]；国防科学技术大学的研究人员将隐半 Markov 模型用于直升机齿轮箱轴承故障诊断^[31]，定义了一种基于希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 的统计性状态指标值，并将其用于直升机行星齿轮断齿故障检测^[32]，提出了基于物理模型和灰色理论的行星齿轮损伤程度识别算法^[33-37]，提出了基于循环平稳时间序列分析的直升机齿轮裂纹早期故障检测方法以及基于多传感器混合隐 Markov 模型的直升机齿轮箱故障诊断方法^[38-40]，提出了将基于粒度计算的规则抽取算法用于直升机传动系统的故障诊断^[41]方法，研究了直升机传动系统状态增强检测的随机共振理论及关键部件故障特征的优化问题^[42-43]；南昌航空大学的研究人员研究了直升机行星齿轮的故障诊断问题^[44]和自动倾斜器滚动轴承的故障诊断问题^[45]；军械工程学院的研究人员提出了基于 EM-KF 算法的直升机主减速器剩余寿命预测方法^[46]，对直升机行星齿轮的故障诊断问题进行了仿真研究^[47]；上海交通大学的研究人员提出了基于时域同步平均算法的直升机传动系统振动信号消噪方法^[48]；湖南大学的研究人员开发了基于时频分析的直升机齿轮箱故障诊断软件^[49]；中南大学的研究人员研究了直升机滚动轴承的寿命预测及可靠性问题^[50]，建立了基于 L-P 理论和 Hertz 接触理论的直升机主减速器分扭传动直齿轮疲劳寿命评估方法^[51]。

综上所述，国内外学者针对直升机齿轮箱的状态监测与故障诊断问题开展了一系列的研究，这些研究主要集中在模型分析、寿命预测和信号处理方面，在故障特征提取及增强和诊断系统集成化方面取得了许多成果。

1.2 机械故障诊断技术的研究意义和研究现状

1.2.1 研究意义

直升机齿轮箱属于旋转机械的范畴。旋转机械是最常见的机械设备，广泛应用于能源、电力、机械、航空、化工和纺织等重要工程领域。旋转机械往往是工厂企业的关键设备，它的运行状况不仅影响其自身的运转，而且会对相关的机械设备产生直接的影响。如果旋转机械出现故障，这种情况轻则会影响工厂企业的

正常运作，重则会造成重大的经济损失，甚至出现毁机事故和人员伤亡。因此，为保障机械设备的安全运行、消除安全隐患和提高设备的使用效益，迫切需要加强对旋转机械状态监测和故障诊断的研究^[52, 53]。

近年来，机械故障诊断技术与力学、机械、信号处理、传感器与检测技术、人工智能和计算机等技术紧密结合，逐渐形成了一门新的交叉学科，在工程实际中发挥了越来越大的作用^[54]。随着科学技术的发展，那些与国民经济有密切联系的电力、能源、石化、航空航天和国防等关键行业的机械设备日趋大型化、复杂化和智能化。机械设备的这种发展趋势使传统的机械故障诊断技术面临严峻的考验。最近几年，国内外已经发生多起因机械设备故障而引起的灾难性事故^[55]。如果在机械设备刚出现故障时，人们能够借助故障诊断技术及时发现故障并进行有效的处理，这样不但能够有效地保证机械系统的正常运行，而且能够避免这些重大事故的发生。机械故障诊断技术是机械工程领域的主要研究方向之一，国家高技术发展研究计划（863 计划）的先进制造技术领域近年来把“重大产品和重大设施寿命与预测技术”列为优先发展的四大专题之一，其中就包括了“系统故障诊断与维修优化技术”^[56]。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》和《机械工程学科发展战略报告（2011—2020 年）》均将与机械故障诊断技术相关的重大设备和关键设施的运行安全性、养护及服役状态监测和安全评估技术作为重要的研究方向^[57]。

近年来，故障诊断技术逐渐受到国内外学者的高度重视，国内外许多著名研究机构分别就故障诊断技术的前沿问题召开了国际学术会议。由 IEEE 等国际学术组织召开的状态监测与诊断国际会议（International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD）每两年召开一次，主要讨论电力系统方面的故障诊断问题。世界维修大会（World Congress on Maintenance）由欧盟国家维修联合会和巴西维修协会共同倡议发起，得到许多国家的积极响应，每两年召开一次。国际结构、材料和环境健康监测大会（Health Monitoring of Structure Material and Environment, HMSME）每两年举行一次，是国际结构健康监测和结构控制领域的国际盛会。结构健康监测国际会议（International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM）是美国斯坦福大学举办的大型结构健康监测国际会议，每两年举行一次，吸引了大量研究人员特别是军方人士的参与。结构损伤评估国际会议（International Conference on Damage Assessment of Structures, DAMAS）每两年召开一次，为学术界和工程界的科学家和工程师提供一个交流结构损伤评价和健康监测理论及其应用的平台。状态监测与诊断工程管理国际会议（Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM）自 1988 年举行

第一届会议以来,每年举行一次,主要交流工业设备维修技术、故障检测、诊断和预测技术在理论和应用方面的最新进展。在国内,中国机械工程学会、中国振动工程学会和中国设备管理协会等学术组织都是每三年召开一次故障诊断会议,中国振动工程学会故障诊断专业委员会每两年召开一次学术会议,专门讨论故障诊断技术在理论和应用方面的最新进展。

虽然机械故障诊断技术在最近几年已经在理论创新和实际应用方面取得了很大的成绩,但是由于诊断对象的复杂性,现有的机械故障诊断技术在理论上和实际应用中仍然存在着许多不足^[52, 58, 59]。因此,将新理论和新方法引入到机械故障诊断领域,从而不断提高机械故障诊断技术的水平,对于推动机械故障诊断技术的发展具有重要的意义。

1.2.2 研究现状

机械故障诊断技术是一门以机器学为基础的综合性学科,它的实质是机器运行状态的模式识别问题^[60]。自从20世纪六七十年代美国和英国相继开展机械故障诊断技术方面的研究工作以来,故障诊断技术在全世界范围内得到了广泛的关注,世界范围内的科学家和工程师在故障特征提取和识别分类方面进行了许多有益的探索。美国国家航空航天局在60年代末成立了机械故障预防小组(Machinery Fault Prevention Group, MFPG),积极从事故障诊断理论和应用方面的研究工作^[61]。英国在70年代成立了机械健康监测中心(The United Kingdom Mechanical Health Monitoring Center),积极从事设备故障诊断技术的开发和交流工作^[62]。美国麻省理工学院的学者利用混合智能系统对核电站的运行状况进行了在线监测^[63]。美国密歇根大学、辛辛那提大学和密苏里大学罗拉分校联合工业界共同成立了智能维护系统(Intelligent Maintenance Systems, IMS)中心,致力于嵌入式和远程监测、预测技术、智能决策和设备自愈能力的研究和开发工作^[64]。美国斯坦福大学的Chang等长期从事复合材料健康监测方面的研究工作^[65]。美国佐治亚理工学院的Gebrael等提出了基于神经网络算法的机械零部件寿命预测模型^[66]。英国曼彻斯特大学、南安普顿大学和剑桥大学长期从事机械设备在线监测与维护、损伤识别和可靠性等方面的研究工作^[67]。以色列技术学院的Feldman等详细研究了Hilbert变换方法在机械振动信号分解和特征提取中的应用^[68, 69]。日本九州工业大学的Chen等提出了故障征兆参数的自动化函数变换方法,并将其应用于机械故障信号的特征提取^[70]。法国贡匹爱涅大学的Antoni和澳大利亚新南威尔士大学的Randall

提出了谱峭度的概念并将其应用于机械故障诊断^[71, 72]。英国谢菲尔德大学的 Worden 等在结构健康监测和疲劳寿命预测方面取得了许多显著性的成果^[73, 74]。加拿大阿尔伯特学院的 McDonald 等对典型机械零部件的故障特征进行了深入的研究^[75]。美国康涅狄格州立大学的 Yan 等在设备状态监测和故障诊断方面做了许多工作^[76]。加拿大渥太华大学的 Wang 等长期从事机械故障诊断方面的研究工作^[77]。

国内方面, 香港城市大学的 Rafiee 等长期从事机械故障信号分析和特征提取方面的研究工作, 取得了显著的成果^[78]。天津大学的陈予恕采用混沌和分岔理论深入研究了转子的非线性动力学行为^[79]。北京化工大学的高金吉对引起机械振动故障的直接原因进行了总结分类, 研究了涡轮机械故障征兆参数与故障原因类别之间的关系^[80]。华中科技大学的杨叔子等在机械故障诊断技术的研究方面取得了显著的成果^[81]。东北大学的闻邦椿提出了“振动利用工程”的概念并将其应用于机械设备的振动分析^[82]。西安交通大学的屈梁生、何正嘉等长期从事机械故障诊断问题的研究, 提出了全息谱的概念^[60, 83]。中南大学的钟掘等长期从事机械故障诊断、系统辨识和失效分析等方面的研究工作^[84]。清华大学的褚福磊等在现代信号处理及摩擦故障诊断技术方面取得了显著的成果^[56]。国防科技大学的陈敏等和天津大学的张莹等开展了基于随机共振理论的早期微弱信号检测研究^[85, 86]。上海交通大学的 Cong 等在微弱故障信号的特征提取方面取得了一系列进展^[87]。重庆大学的秦树人等在机械故障信号的特征提取和分类方面做了大量的工作^[88]。东南大学的 Jiang 等在机械故障诊断理论和应用方面取得了显著的成果^[89]。湖南大学的 Cheng 等长期从事机械故障诊断理论及其应用方面的研究^[90]。华南理工大学的丁康等在离散频谱分析校正和齿轮箱故障诊断方面取得了一系列成果^[91, 92]。北京科技大学的 Li 等在机械故障信号的非线性动力学特征提取方面取得了进展^[93]。另外, 哈尔滨工业大学的黄文虎等^[94]、太原理工大学的熊诗波等^[95]、北京科技大学的石博强等^[96]、浙江大学的曹冲锋等^[97]、北京工业大学的高立新等^[98]、北京信息科技大学的徐小力等^[99]和郑州大学的韩捷等^[100]都在机电设备状态监测和故障诊断理论及其应用方面作出了贡献。

1.3 基于信号分析和处理技术的机械故障诊断方法

在传统的信号分析领域, 傅里叶变换 (Fourier Transform, FT) 是一个重要的数学工具, 曾经在信号分析与处理中发挥了重要的作用。然而, 作为一个基于平

稳线性理论的方法, 傅里叶变换在实际应用中存在许多不足^[101], 这些不足主要体现在三个方面^[102, 103]: 缺乏时间和频率的定位功能; 对于非平稳信号的局限性; 在分辨率上的局限性。针对傅里叶变换方法在信号处理中的不足, 人们提出了时频分析方法及其他的一些方法, 下面将对这些方法进行一些简单的介绍。

1.3.1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换 (Short Time Fourier Transform, STFT) 又称为加窗傅里叶变换 (Windowed Fourier Transform, WFT), 是傅里叶变换方法的自然推广, 它是 Gabor 在 1946 年提出的一个时频分析方法^[101]。短时傅里叶变换可以在一定程度上克服傅里叶变换方法不能有效分析非平稳信号的缺点, 是最早和最常用的一种时频分析方法^[56, 88, 104, 105]。短时傅里叶变换是基于傅里叶变换的方法, 它采用一个窗函数与待分析的信号相乘, 把窗口内的信号看成平稳信号, 通过窗口的移动来覆盖整个信号。短时傅里叶变换在机械故障信号特征提取、故障检测和生物医学信号分析等方面得到了广泛的应用^[106, 107]。然而, 短时傅里叶变换的窗口大小是固定不变的, 因此时间分辨率和频率分辨率不能根据信号的特点而自适应性地变化^[108], 不满足多分辨率分析的要求。此外, 从严格的意义上来说, 短时傅里叶变换是把窗口内的数据近似地作为平稳信号来处理, 所以它只适合处理缓变的非平稳信号^[58], 不适合处理快变的机械故障信号。再者, 短时傅里叶变换的离散形式没有正交展开形式, 难以实现高效的算法, 这些缺点限制了短时傅里叶变换在机械故障信号处理中的应用^[109]。

1.3.2 Winger-Ville 分布

由于傅里叶变换和短时傅里叶变换不能满足对非平稳信号分析的要求, 人们迫切希望发展一种同时具有时间和频率分辨率的时频分析方法。Wigner 于 1932 年最先在量子力学的研究中提出了 Wigner 分布的概念, 随后 Ville 在 1984 年将 Wigner 分布引入到信号处理领域, 因此 Wigner 分布又称为 Wigner-Ville 分布 (Wigner-Ville Distribution, WVD)^[88]。Winger-Ville 分布是一种双线性形式的变换, 具有很高的时频分辨率, 具有优秀的时频聚集性, 另外还具有诸如实值性、时移不变性和频移不变性等许多优良的数学性质^[102], 因此 Winger-Ville 分布在机械故障信号分析和特征提取中得到了广泛的应用^[110]。但是, Winger-Ville 分布存在两个明显的缺点: 一个是在分析多分量信号时容易出现严重的交叉项干扰; 另一个是不能保证分析结果的非负性^[102]。这些缺点在一定程度上限制了 Winger-Ville 分布在机械故

障信号处理中的应用。

1.3.3 小波变换

从傅里叶变换到短时傅里叶变换再到对自适应窗口的需求反映了信号分析过程中的一个共同的基本要求，这就是具有自适应窗口特性和平移功能。另外，为了实现高效算法，要求积分变换的核函数必须是正交基。一般来说，变窗口、平移和正交性是一个信号分析方法能够成为最有效信号分析工具的主要条件^[56]。小波变换 (Wavelet Transform, WT) 正是为满足这个需求而发展起来的信号分析方法^[111]。与短时傅里叶变换不同，小波变换在时频平面的不同位置具有不同的分辨率，因此具有多分辨特性。小波变换的目的是“既要看到森林 (信号的概貌)，又要看到树木 (信号的细节)”^[103]，因此小波变换又称为数学显微镜。由于小波变换具有许多优秀的性能，因此它已经在包括机械故障诊断在内的多个领域得到了广泛的应用^[112-114]。但是，小波变换的基函数难以选择，而且基函数一旦确定，在整个变换过程中就不能再改变，因而缺乏针对所研究信号局部特点的自适应性。此外，小波变换本质上是窗口可调的傅里叶变换方法，所以默认小波窗口内的信号是平稳的，因而没有从根本上摆脱傅里叶变换的局限性。再者，小波基的有限长度会造成信号能量的泄漏，从而导致小波变换的分析结果失真。这些缺点影响了小波变换在机械故障信号分析中的效果。

1.3.4 经验模式分解

机械故障信号通常是非平稳非线性信号，短时傅里叶变换、Winger-Ville 分布和小波变换等方法都能够不同程度地刻画这类信号的非平稳性^[115]。对非平稳非线性信号进行分析的有效方法是使用具有局部特性的基本量和基本函数。Huang 在对瞬时频率的概念进行深入研究的基础上，提出了一种新的非平稳非线性信号处理方法——经验模式分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD)。经验模式分解方法能够通过一个筛分过程分离出一族内禀模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)，原则上每个内禀模态函数代表了一个单一的振动模态，因而这些内禀模态函数具有明确的物理意义。经验模式分解方法在一定程度上解决了多分量信号的瞬时频率难以确定的问题，是一个借助瞬时频率来表征时变信号局部非平稳性的信号处理方法。与短时傅里叶变换、Winger-Ville 分布和小波变换等方法所采用的固定窗函数相比，经验模式分解方法可以根据所分析信号的局部特征自适应地匹配分解信号的尺度，因此是真正意义上的数据驱动方法。经验模式分解方法自提出以来就在包括机械故障诊断在内的多个领

域得到了广泛的应用^[90, 109, 116, 117]。虽然经验模式分解方法具有很多优势,但是它仍然存在着诸如模态混叠、三次样条曲线过冲和欠冲、缺乏统一的筛分停止准则、端点效应和偶尔出现的负频率等缺点^[118-120]。为了克服经验模式分解方法的这些缺陷,许多学者不断尝试对原始的经验模式分解方法进行改进,得到了几个经验模式分解方法的变体,其中最著名的是总体经验模式分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)^[118]。总体经验模式分解是一个噪声辅助的方法,可以缓解经验模式分解方法中存在的模态混叠问题^[118]。目前,总体经验模式分解方法已经在机械故障诊断等领域得到应用^[121, 122],获得了比经验模式分解方法更好的效果。但是总体经验模式分解方法存在着辅助白噪声的幅值难以确定和计算效率低等缺陷^[123]。

1.3.5 局部均值分解

在经验模式分解方法中,筛分过程要通过三次样条曲线拟合信号的上下极值点来实现,但是三次样条曲线在拟合的过程中存在着过冲、欠冲和端点效应等缺陷,因此经验模式分解方法包含着三次样条曲线的全部缺陷。Smith在对经验模式分解方法及三次样条函数研究的基础上,于2005年提出了一种新的信号筛分方法——局部均值分解(Local Mean Decomposition, LMD)^[119]。局部均值分解方法利用两相邻极值点之间的和差关系来构建两相邻极值点之间的均值点和极值点,然后通过滑动平均的方法对产生的均值点和极值点进行滑动平均,从而得到信号的中线和包络线,这种处理方法在一定程度上克服了由三次样条函数包络方法所产生的过冲、欠冲和端点效应等缺陷^[119]。局部均值分解方法是一种新型的非平稳非线性信号处理方法,目前已经在生物医学信号处理^[119]和机械故障诊断^[124]中得到应用。然而,由于局部均值分解算法采用平滑算法来拟合信号包络和均值曲线,这样它就会继承平滑算法的所有缺陷,例如,最优平滑步长难以选择、当平滑的次数较多时会出现明显的时间延迟现象等问题^[125]。此外,局部均值分解算法还存在着端点效应和缺乏快速算法等缺陷^[125]。

1.3.6 盲源分离

多分量混叠信号的分解和特征提取技术是信号处理中经常遇到的问题,而主分量分析(Principal Component Analysis, PCA)^[126]和奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)^[127, 128]是解决这个问题的传统方法。然而,如果待分解的信号不是高斯过程,那么主分量分析和奇异值分解等传统的信号分析技术只能保证信号分解结果之间的正交性和不相关性,而不能保证信号分解结果之间的独立性。独立分量