

机械工程前沿著作系列
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers

HEP
MEF

齿轮箱早期故障精细诊断技术

分数阶傅里叶变换原理及应用

Diagnostic Technology of Gearbox's Early Fault

Fractional Fourier Transform Principle and Its Applications

梅检民 肖云魁 编著

高等教育出版社

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

CHILUNXIANG ZAOQI
GUZHANG JINGXI
ZHENDUAN JISHU

齿轮箱早期故障精细诊断技术

分数阶傅里叶变换原理及应用

Diagnostic Technology of Gearbox's Early Fault

Fractional Fourier Transform Principle and Its Applications

梅检民 肖云魁 编著

高等教育出版社·北京

内容简介

本书主要介绍了齿轮箱早期故障精细诊断技术,通过分析齿轮箱瞬变工况下非稳态振动信号,实现早期故障不解体诊断,对避免重大事故、减小经济损失具有重要意义。

本书将分数阶傅里叶变换的独特优势与齿轮箱瞬变工况故障诊断的实际特点紧密结合,以齿轮箱变速过程壳体振动信号为研究对象,以分数阶傅里叶变换为技术基础,按照“目标分离—噪声抑制—特征增强”精细处理思路研究早期故障精细诊断技术。本书主要内容包括:分数阶傅里叶变换基本理论、齿轮与轴承常见故障机理分析、单阶与多阶分数阶滤波、高阶谱与高阶累积量、分数阶聚能带时频累加谱、全息阶比谱、倒阶次谱、对称极坐标、极坐标角—频分布、极坐标级联增强等。

本书是一部关于分数阶傅里叶变换在非稳态振动信号处理领域的理论创新和工程应用的专著,取材先进、实用性强,适合作为高等院校车辆工程、载运工具运用工程、动力工程、仪器科学技术等学科的博士研究生、硕士研究生、高年级本科生的教材或参考书,对于从事汽车动态分析、汽车检测与诊断、汽车维修的工程技术人员具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

齿轮箱早期故障精细诊断技术:分数阶傅里叶变换原理及应用 / 梅检民, 肖云魁编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2016.6

(机械工程前沿著作系列)

ISBN 978-7-04-045152-8

I. ①齿… II. ①梅… ②肖… III. ①齿轮箱—故障诊断 IV. ①U260.332

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第074891号

策划编辑 刘占伟 责任编辑 刘占伟 封面设计 杨立新 版式设计 张杰
插图绘制 邓超 责任校对 殷然 责任印制 赵义民

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京市白帆印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16.25
字 数 300千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2016年6月第1版
印 次 2016年6月第1次印刷
定 价 79.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 45152-00

前言

随着车辆制造技术的不断发展,车辆性能不断提升,结构也越来越复杂。变速器是齿轮箱的典型应用,作为车辆传输动力的重要总成,其性能的好坏直接影响车辆的机动能力。变速器早期故障特征微弱,难以诊断;而故障恶化后容易造成更大事故和经济损失。在不解体条件下对车辆变速器进行有效状态检测,及时发现早期故障,对避免重大事故、减小经济损失具有十分重要的意义。

维修专家认为,瞬变工况下更容易暴露早期故障微弱特征,但信号的多分量、非平稳和低信噪比特性增加了特征提取难度,需要先进的非平稳信号处理理论和方法。随着非平稳信号处理理论的不发展与成熟,产生了许多新的信号处理手段。分数阶傅里叶变换 (fractional Fourier transform, FRFT) 作为非平稳信号处理理论的重要分支之一,由于其独有的特点而受到众多研究人员的青睐,近年来在雷达、声呐、通信、信息安全等领域不断得到应用,并涌现出众多新的研究成果。

30 年来,作者所在的课题组致力于车辆非平稳振动信号处理的理论研究与方法探索,在车辆技术状态检测与故障诊断方向上取得了不少先进性的成果。近年来,作者集中研究了分数阶傅里叶变换理论与方法,将分数阶傅里叶变换的独特优势与变速器瞬变工况故障诊断的实际特点紧密结合,以变速器变速过程壳体振动信号为研究基础,按照“目标分离—噪声抑制—特征增强”精细处理思路研究早期故障精细诊断技术,为实现变速器不解体状态检测、早期故障诊断提供有效的技术手段,为进一步丰富非平稳信号故障诊断理论和技术,促进分数阶傅里叶变换在非平稳振动信号处理领域的深入发展奠定基础。书中涉及的早期故障是指在变速器稳态或非稳态运转条件下,凭借专家经验或传统特征提取方法难以诊断的损伤较小、特征微弱的故障。

本书体系完整,层次清晰,注重内容的实用性、系统性、先进性和工程应用性。全书分 4 篇,共 12 章,具体安排如下:

第一篇分数阶傅里叶变换及瞬变工况故障诊断基础,包括第 1~3 章,第 1 章介绍分数阶傅里叶变换的发展及应用现状、瞬变工况故障诊断及方法现状;第 2 章介绍分数阶傅里叶变换的基本理论;第 3 章介绍齿轮和轴承常见故障机理及其振动特征。

第二篇分数阶域目标分离,包括第4~6章,主要研究携带故障信息的目标分量的分离技术和方法。第4章主要介绍有转速计和无转速计的单阶分数阶滤波方法,并应用于频率呈线性变化的急加速过程中齿轮和轴承的故障诊断;第5章介绍基于转速自适应分段的多阶分数阶滤波,实现了变转速过程频率呈曲线变化的目标分量分离与特征提取;第6章介绍基于稀疏信号分解的无转速计多阶分数阶滤波及齿轮特征提取方法,实现了无转速计条件下频率呈曲线变化信号的瞬时频率估计、目标分量分离和阶比分析,提取故障特征。

第三篇噪声抑制,包括第7~10章,主要研究分离后目标分量的噪声抑制技术和方法。第7章介绍基于FRFT滤波的高阶谱与高阶累积量方法,对FRFT滤波后的分量进行高阶谱和高阶累积量分析,抑制通带内残留的噪声,提取故障特征;第8章从时频分析角度介绍分数阶聚能带时频累加谱方法,不需要滤波便能快速检测变速器急加速过程齿轮啮合阶比分量的振动能量变化,提取微弱故障特征,与特征频率分析方法相比,是一种能量检测方法;第9章介绍基于FRFT滤波的全息阶比谱,对多个测试位置的目标分量进行全息分析,综合多特征进行故障诊断,相比单测点单特征诊断,具有更好的准确性和可靠性;第10章介绍倒阶次谱改进方法,LMD倒阶次谱先剥离目标分量再细致分析,Teager能量增强倒阶次谱先增强冲击特征再深入提取,从不同角度提取轴承微弱故障特征。

第四篇特征增强,包括第11、12章,主要研究微弱故障特征的极坐标增强技术和方法。第11章介绍提取齿轮磨损故障特征的极坐标角-频分布和对称极坐标方法,将振动信号转换为图像,为齿轮磨损特征识别提供可视化方法;第12章介绍极坐标增强方法,采用Teager能量算子一级增强冲击特征,再通过极坐标二级增强轴承故障特征,最终提取轴承早期单一和并发故障特征。

本书由梅检民、肖云魁编著,贾继德教授、曾锐利副教授主审。其中,梅检民撰写第1、3、4、6、7、8章,常春、王国威撰写第2章,李枫撰写第5章,周斌撰写第9章,杨万成、张玲玲撰写第10章,贾继德撰写第11章,赵慧敏、肖静撰写第12章。书稿撰写中,赵新顺博士、沈虹博士、高长桥工程师、陈祥龙博士、杨青乐硕士、江红辉讲师、栾登旺高工、杨淑女士、刘远宏硕士、乔龙硕士、任金成硕士、孙波硕士、吴春志硕士、赵磊硕士等参与了部分章节的编写以及资料的整理工作。

本书的出版,要感谢军事交通学院领导、军用车辆系领导的关心与帮助!由于编者水平有限,有些问题研究得还不够深入,加之时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正!

编者

2015年6月于天津

目录

第一篇 分数阶傅里叶变换及瞬变工况故障诊断基础

第 1 章 绪论	3
1.1 分数阶傅里叶变换的发展及应用现状	3
1.1.1 分数阶傅里叶变换的发展	3
1.1.2 分数阶傅里叶变换的特点	4
1.1.3 分数阶傅里叶变换在信号处理中的应用	4
1.2 变速器瞬变工况故障诊断	6
1.2.1 瞬变工况故障诊断意义	6
1.2.2 瞬变工况故障诊断方法	6
本章小结	8
参考文献	9
第 2 章 分数阶傅里叶变换的基本理论	15
2.1 分数阶傅里叶变换定义与性质	15
2.1.1 基本定义	15
2.1.2 主要性质	18
2.2 分数阶算子及分数阶变换	19
2.2.1 分数阶算子	19
2.2.2 分数阶变换	28
2.3 分数阶傅里叶变换的数值计算	39
2.3.1 数值计算方法简介	39
2.3.2 Ozaktas 采样型算法	40
本章小结	44
参考文献	44
第 3 章 齿轮与轴承常见故障机理分析	45
3.1 齿轮常见故障机理分析	45
3.1.1 齿轮常见故障及原因	46

3.1.2 齿轮振动信号特征	47
3.2 轴承常见故障机理分析	48
3.2.1 轴承常见故障及原因	48
3.2.2 轴承振动信号特征	49
3.3 瞬变工况信号采集	51
3.3.1 非稳态信号采集系统	51
3.3.2 变速器实验装置与故障设置	52
3.4 瞬变工况信号重复性分析	54
3.4.1 阶比分析原理	54
3.4.2 稳健阶比分析原理	60
3.4.3 重复性分析	64
本章小结	67
参考文献	67

第二篇 分数阶域目标分离

第 4 章 单阶分数阶滤波	71
4.1 有转速计单阶分数阶滤波	71
4.1.1 单阶分数阶滤波原理	71
4.1.2 单阶分数阶滤波参数确定	72
4.1.3 齿轮故障诊断应用	75
4.1.4 轴承故障诊断应用	82
4.2 无转速计单阶分数阶滤波	86
4.2.1 无转速计 FRFT 滤波存在的问题	86
4.2.2 基于 LMD 确定 FRFT 阶次原理	87
4.2.3 基于 LMD 确定阶次的 FRFT 滤波实现	87
4.2.4 齿轮故障诊断应用	89
本章小结	92
参考文献	92
第 5 章 基于转速自适应分段的多阶分数阶滤波	93
5.1 多阶分数阶滤波原理	93
5.2 基于转速自适应分段的多阶 FRFT 滤波	94
5.2.1 基于转速信号进行自适应分段	94
5.2.2 基于转速信号确定 FRFT 最佳阶次	95
5.2.3 算法实现与验证	95

5.3 齿轮故障诊断应用	98
本章小结	99
参考文献	100
第 6 章 基于稀疏信号分解的无转速计多阶 FRFT 滤波	101
6.1 基于 FRFT 的多尺度线调频基稀疏信号分解	102
6.1.1 基于多尺度线调频基的稀疏信号分解原理	102
6.1.2 基于 FRFT 的多尺度线调频基稀疏信号分解方法	105
6.1.3 性能分析	109
6.1.4 应用实例	112
6.2 基于稀疏信号分解的多阶 FRFT 滤波	113
6.2.1 多阶 FRFT 自适应滤波存在的问题	113
6.2.2 基于稀疏信号分解的多阶 FRFT 自适应滤波	114
6.2.3 仿真分析	115
6.2.4 应用实例	117
6.2.5 有效性分析	119
6.3 基于稀疏信号分解和分段拟合积分逼近的无转速计阶比分析	119
6.3.1 无转速计阶比分析原理及存在的问题	120
6.3.2 基于稀疏信号分解和分段拟合积分逼近的无转速计阶比原理	121
6.3.3 仿真分析	124
6.3.4 应用实例	127
6.4 齿轮早期故障特征提取	128
本章小结	129
参考文献	129

第三篇 噪声抑制

第 7 章 基于 FRFT 滤波的高阶谱与高阶累积量	133
7.1 高阶累积量与高阶谱原理	134
7.1.1 高阶累积量	134
7.1.2 高阶谱	136
7.2 基于 FRFT 滤波的单分量阶比双谱	137
7.2.1 阶比双谱定义及交叉项分析	137
7.2.2 基于 FRFT 滤波的单分量阶比双谱算法	139
7.2.3 单分量阶比双谱消除实测信号交叉项	139
7.2.4 齿轮早期故障特征提取	142
7.2.5 有效性分析	145

7.3 基于 FRFT 滤波的四阶累积量切片谱	146
7.3.1 四阶累积量切片谱	146
7.3.2 基于 FRFT 滤波的四阶累积量切片谱算法	147
7.3.3 齿轮故障特征提取	147
7.3.4 普适性分析	148
本章小结	150
参考文献	150
第 8 章 分数阶聚能带时频累加谱	153
8.1 信号的时频分布	153
8.1.1 时频表示的基本概念	153
8.1.2 时频分布的一般理论	157
8.1.3 Wigner-Ville 分布	161
8.1.4 模糊函数	164
8.1.5 Cohen 时频分布	164
8.1.6 时频分布比较分析	169
8.2 重排 Gabor 时频分析原理	174
8.3 多分量 LFM 信号时频分析存在的两个问题	176
8.4 分数阶聚能带时频谱及累加谱分析	176
8.4.1 分数阶聚能带时频谱分析	176
8.4.2 分数阶聚能带时频累加谱分析	178
8.5 齿轮早期故障特征提取及有效性分析	179
8.5.1 齿轮早期故障特征提取	179
8.5.2 有效性和可靠性分析	181
本章小结	184
参考文献	184
第 9 章 基于 FRFT 滤波的全息阶比谱	185
9.1 全息谱原理与离散实现	185
9.1.1 二维全息谱	185
9.1.2 二维全息谱的离散实现	186
9.2 基于 FRFT 滤波的稳健全息阶比谱分析原理与分析步骤	187
9.2.1 基于 FRFT 滤波的稳健全息阶比谱原理	187
9.2.2 基于 FRFT 滤波的稳健全息阶比谱分析步骤	188
9.3 齿轮早期故障特征提取	188
9.3.1 FRFT 滤波提取单测点特征	188
9.3.2 啮合阶比分量的 SHOS-FF 分析	190
9.3.3 调制阶比分量的 SHOS-FF 分析	192

9.3.4 有效性分析	193
本章小结	193
参考文献	194
第 10 章 倒阶次谱分析	195
10.1 倒频谱与倒阶次谱原理	195
10.1.1 倒频谱	195
10.1.2 倒阶次谱	197
10.2 LMD 倒阶次谱分析与轴承特征提取	197
10.2.1 LMD 倒阶次谱	197
10.2.2 轴承外圈剥落故障诊断实例	198
10.2.3 轴承内圈剥落故障诊断实例	200
10.3 Teager 能量增强倒阶次谱与轴承特征提取	202
10.3.1 Teager 能量算子增强倒阶次谱原理	202
10.3.2 诊断实例	203
本章小结	207
参考文献	207
第四篇 特征增强	
第 11 章 极坐标角-频分布与对称极坐标	211
11.1 极坐标角-频分布方法与齿轮磨损故障特征提取	211
11.1.1 极坐标角-频分布原理及特征提取	211
11.1.2 BP 神经网络	213
11.1.3 变速箱齿轮磨损故障实例分析	217
11.2 对称极坐标方法与齿轮磨损故障特征提取	221
11.2.1 对称极坐标表示方法及分类识别	221
11.2.2 齿轮磨损故障诊断举例	222
本章小结	228
参考文献	228
第 12 章 Teager 能量算子与极坐标级联增强	231
12.1 方法原理	231
12.1.1 极坐标时频特征增强	231
12.1.2 Teager 能量算子	232
12.1.3 基于 Teager 能量算子的极坐标时频特征增强	232

12.2 EPTFT 仿真分析	232
12.2.1 单调制分量信号 EPTFT 分析	232
12.2.2 多调制分量信号 EPTFT 分析	234
12.3 轴承早期故障特征提取	235
12.4 有效性评价分析	237
12.4.1 轴承特征参数选择与有效性准则	237
12.4.2 极坐标增强有效性分析	238
12.4.3 OED 方法有效性评价分析	241
本章小结	245
参考文献	245

第一篇

分数阶傅里叶变换及瞬变工况
故障诊断基础

第 1 章 绪 论

1.1 分数阶傅里叶变换的发展及应用现状

1.1.1 分数阶傅里叶变换的发展

傅里叶变换几乎在科学研究与工程技术的所有领域发挥着重要的作用,但随着研究对象和研究范围的不断扩展,也逐步暴露了在某些问题研究上的局限性,主要体现在:它是一种全局性变换,得到的是信号的整体频谱,因而无法表述信号的时频局部特性,而这种特性正是非平稳信号最根本和最关键的性质。为了分析和处理非平稳信号,人们提出并发展了一系列新的信号分析理论:分数阶傅里叶变换 (fractional Fourier transform, FRFT)、短时傅里叶变换、Wigner 分布、Gabor 变换、小波变换、循环统计量理论和调幅-调频信号分析等。而分数阶傅里叶变换作为傅里叶变换的广义形式,由于其独有的特点而受到众多科研人员的青睐。近年来,关于分数阶傅里叶变换理论与应用的研究成果层出不穷,正形成深入发展的趋势。

1980 年, Namias 从特征值和特征函数的角度,以纯数学的方式提出了分数阶傅里叶变换的概念^[1],用于微分方程求解。其后, McBride 等用积分形式为分数阶傅里叶变换进行了更为严格的数学定义^[2],为其后从光学角度提出分数阶傅里叶变换的概念奠定了基础。1993 年, Mendlovic 和 Ozaktas 给出了分数阶傅里叶变换的光学实现,并将之应用于光学信息处理^[3-4]。

由于分数阶傅里叶变换采用光学设备容易实现,所以在光学领域很快便得到了广泛应用^[5]。尽管在信号处理领域分数阶傅里叶变换具有潜在的用途,但由于缺乏有效的物理解释和快速算法,使得分数阶傅里叶变换在信号处理领域迟迟未得到应有的认识。直到 1993 年 Almeida 指出分数阶傅里叶变换可以理解为时频平面的旋转,1996 年 Ozaktas 等提出了一种计算量与 FFT 相当的离散算法后,分数阶傅里叶

变换才吸引了越来越多信号处理领域学者的注意,并出现了大量的相关文章。

1.1.2 分数阶傅里叶变换的特点

分数阶傅里叶变换实质上是一种统一的时频变换,同时反映了信号在时、频域的信息。与常用二次型时频分布不同的是,它用单一变量来表示时频信息,没有交叉项干扰;与传统傅里叶变换(其实是分数阶傅里叶变换的一个特例)相比,它适于处理非平稳信号,尤其是线性调频信号(chirp类信号),且多了一个自由参量(变换阶数 p)。因此,分数阶傅里叶变换在某些条件下往往能够得到传统时频分布或傅里叶变换所得不到的效果,而且由于它具有比较成熟的快速离散算法,在得到更好效果的同时并不需要付出太多的计算代价。目前分数阶傅里叶变换在信号处理领域的应用主要有如下6种方式,也正体现了分数阶傅里叶变换的6大优势:

(1) 分数阶傅里叶变换是一种统一的时频变换,随着阶数从0连续增长到1,分数阶傅里叶变换展示出信号从时域逐步变化到频域的所有变化特征,可以为信号的时频分析提供更大的选择空间;最直接的利用方式就是将传统时、频域的应用推广到分数阶傅里叶域,以获得某些性能上的改善,如分数阶傅里叶域滤波^[6-9]等。

(2) 分数阶傅里叶变换可以理解为 chirp 基分解,十分适合处理 chirp 类信号,分数阶傅里叶变换在雷达^[10-13]、通信^[14-16]、声呐^[17-20]等领域的 chirp 信号处理中发挥了重要作用。

(3) 分数阶傅里叶变换是对时频平面的旋转,利用这一点可以建立起分数阶傅里叶变换与时频分析工具的关系,既可以用来估计瞬时频率、恢复相位信息^[21],又可以用来设计新的时频分析工具^[22]。

(4) 相较傅里叶变换,分数阶傅里叶变换多一个自由参数,因此在某些应用场合能够得到更好的效果,如数字水印和图像加密^[23-27]。

(5) 分数阶傅里叶变换是线性变换,没有交叉项干扰,在分析加性噪声时更具优势。

(6) 具有比较成熟的快速离散算法,这保证了分数阶傅里叶变换能够进入数字信号处理的工程实用领域,而且基于它可以为其他的分数阶算子或变换提供快速离散算法,如分数阶卷积、分数阶相关及分数阶 Hartley 变换等。

1.1.3 分数阶傅里叶变换在信号处理中的应用

正是由于分数阶傅里叶变换具有上述优势,近年来在信号处理领域得到越来越多的应用,如滤波、信号检测与参数估计、相位恢复及信号重构、图像处理等。其中,分数阶域滤波、信号检测与参数估计在工程信号处理中应用最多。

1. 分数阶域滤波

线性调频信号由于其非平稳性,在时、频域都具有较大的展宽,单独的时域或频域滤波都不能得到很好的效果。分数阶傅里叶变换可以理解为 chirp 基分解,特别适合于处理 chirp 类信号。利用 chirp 信号在不同阶次的分数阶傅里叶域呈现出不同的能量聚集性的特点,通过选择合适的 FRFT 阶次,使目标 chirp 分量在该分数阶域具有最好的能量聚集性,而其他分量和噪声在此分数阶域都不会聚集,通过分数阶域窄带遮隔就能滤波提取感兴趣的 chirp 分量^[28-29]。当干扰和信号在某个方向上不耦合时,通过一阶分数阶傅里叶变换就可以实现干扰和信号的分离,称为单阶 FRFT 滤波;当干扰和噪声不能通过单一阶次的 FRFT 来完全解除耦合时,可以通过级联多个阶次的单阶 FRFT 来滤除干扰,称为多阶 FRFT 滤波。

分数阶域滤波应用越来越广泛,文献 [6-7] 在分数阶域对线性调频 (linear frequency modulation, LFM) 信号进行了自适应滤波,文献 [30] 基于 FRFT 滤波有效消除了变速器邻近阶比胶合问题,还采用 FRFT 分离变速器啮合阶比分量,实现了单分量阶比双谱,既消除了高阶谱分析多分量信号产生的交叉项影响,又有效抑制了分数阶域滤波后通带内残留的噪声,应用效果令人十分满意^[31]。

2. 分数阶域 LFM 信号检测与参数估计

由于 LFM 信号在不同的分数阶傅里叶变换域上呈现出不同的能量聚集性,检测含有未知参数的 LFM 信号的基本思路是:以旋转角度 α 为变量进行扫描,求观测信号的分数阶傅里叶变换,从而形成信号能量在旋转角度 α 和分数阶域时间轴 u 构成的 (α, u) 平面上的二维分布。在此平面上按阈值进行峰值点的二维搜索即可检测出 LFM 信号并估计其参数。由于 FRFT 的计算可借助 FFT 实现,使得以旋转角度 α 为变量进行扫描的计算量大大减小,与基于 WVD (Wigner-Ville distribution) 或 WVD-HT (Wigner-Ville distribution Hough transform) 的信号检测与估计方法相比,在分析多分量信号时避免了交叉项的困扰,省略了 WVD-HT 方法中时频分布从直角坐标到极坐标的变换和二维的 Hough 变换,从而降低了处理的复杂度;同时,作为一种线性变换,FRFT 保留了信号的相位信息,因此利用 FRFT 可以有效地估计出 LFM 信号的调频率、中心频率、幅值和相位 4 个参数。

基于 FRFT 的 LFM 信号检测原理直观,实现简单,受到越来越多研究人员的重视。文献 [32] 基于矢分数阶傅里叶变换实现了较低信噪比下 LFM 信号检测和参数估计;文献 [33] 提出了一种基于分数阶功率谱的 LFM 信号检测新因子;文献 [34] 根据分数阶傅里叶变换和信号相位微分的关系,实现了信号瞬时频率的估计。

FRFT 在信号处理领域的应用,具有良好的发展潜力,但在工程实际应用中还存在一些问题。如目前多采用峰值搜索方法确定 FRFT 变换的最佳阶次,在分析多分量信号或信噪比较低时,确定阶次的准确性和可靠性不高,影响 FRFT 分析结果。

1.2 变速器瞬变工况故障诊断

1.2.1 瞬变工况故障诊断意义

常规变速器故障诊断,多采用变速器稳定转速下的振动信号作为故障信息载体进行分析和特征提取,这样做的好处是可以很好地保证测取信号的重复性与稳定性。然而,早期故障的基本特点是:信号本身的幅值比较小,并受强噪声的干扰,易于淹没,特征信息难以被提取。根据维修专家共识,大部分机械故障在变转速运行时表现更明显。这是因为,变转速过程中运动机械部件相互撞击更厉害,蕴含了更为丰富的机械故障信息,但存在着信号测试重复性差、信号特征提取困难等诸多问题,为采集装置设计、非平稳信号处理和故障特征提取带来挑战。

1.2.2 瞬变工况故障诊断方法

瞬变工况下,变速器壳体振动信号具有多分量性、非线性和非平稳性,传统的平稳信号处理方法已经不再适用,需要研究有效的非平稳信号处理方法。针对齿轮箱非平稳信号的分析与处理,已经有许多文献涉及,如时频分析、阶比分析、稀疏信号分解等。

1.2.2.1 时频域分析

时频分析是非平稳信号的主要分析方法之一,分为线性和非线性两种形式。线性时频分析主要包括小波变换、短时傅里叶变换和 Gabor 变换等;非线性时频分析中应用最广泛的是二次双线性时频分布,包括谱图、尺度图、Cohen 分布、Wigner-Ville 分布、Choi-Williams 分布等。

时频分析方法在故障特征提取中已得到广泛的应用。小波变换、短时傅里叶变换、Wigner-Ville 在齿轮和轴承等故障诊断中应用比较广泛,也取得了较好效果^[35-36];文献 [37-51] 研究了不同的时频分析方法在故障特征提取及故障诊断中的应用。文献 [52] 改进了 Chirplet 时频分解,并用于分析轴承和齿轮故障信号,有效定位故障。文献 [53] 提出了提取故障特征的时频周期窗观察方法。文献 [54] 提出了基于时频和双谱分析的滚动轴承诊断的方法,有效地识别滚动轴承不同的故障特征。文献 [55-56] 通过图像处理技术对时频图进行分析,提高了诊断能力。文献 [57] 通过时频消噪研究了轴承早期故障诊断。文献 [58] 采用时频压缩方法对转子早期故障进行了有效检测。

线性时频变换直接对时域信号进行变换,对背景噪声的抑制能力较弱,而且时域与频域的同时分辨率较低。双线性时频变换可以比较好地解决这些问题,但对于多分量信号会产生很强的交叉项。分析长数据时,时频分析的计算效率和高分辨率