

行星齿轮箱振动 故障诊断方法

冯志鹏 褚福磊 左明健 著



科学出版社

行星齿轮箱振动故障诊断方法

冯志鹏 褚福磊 左明健 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统阐述了行星齿轮箱故障诊断中涉及的复杂振动信号分析理论方法。本书内容安排由浅入深,章节衔接前后连贯,写作力求易读易懂。内容包括行星齿轮箱的基本结构、工作原理和故障诊断研究进展介绍,行星齿轮箱横向振动和扭转振动信号的 Fourier 频谱特征分析,太阳轮、行星轮、齿圈、行星轮轴承内外圈和滚动体等关键零件故障特征频率计算,调幅-调频振动信号的幅值解调和频率解调分析,齿轮分布式故障和局部故障及行星轮轴承故障的征兆规律总结,非平稳信号时变故障特征的时频分析,以及结合实验数据和现场数据的典型故障诊断案例分析。

本书可作为高等院校机械、航空、船舶、能源和动力等专业的高年级学生和研究生的教材或参考书。也可供从事机械设备状态监测与故障诊断、设备管理与维护等工作的广大科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

行星齿轮箱振动故障诊断方法/冯志鹏,褚福磊,左明健著.
—北京:科学出版社,2015.3
ISBN 978-7-03-043117-2

I. ①行… II. ①冯… ②褚… ③左… III. ①齿轮箱—
机械振动—故障诊断 IV. ①U260.332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016735 号

责任编辑:朱晓颖 张丽花 / 责任校对:朱光兰

责任印制:霍兵 / 封面设计:迷底书装

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

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:8 1/4

字数:166 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

行星齿轮箱结构紧凑，体积小，质量轻，传动比大，承载能力强，传动平稳，传动效率高，适用范围广，满足高速大功率及低速大扭矩的传动要求，在机械制造、交通运输、能源动力、石油化工和冶金矿山等各领域的装备中得到了广泛应用。作为动力传动系统中的关键环节，行星齿轮箱一旦出现故障，会导致整个动力传动链失效甚至停机，造成严重后果。因此，行星齿轮箱故障诊断问题不容忽视。

与普通的定轴齿轮箱相比，行星齿轮箱的结构和运转方式独特。行星齿轮箱通常由太阳轮、行星轮、齿圈和行星架等关键部件组成，其中行星轮同时与太阳轮和齿圈接触啮合。若齿圈固定，太阳轮旋转，则行星轮在自转的同时还随行星架围绕太阳轮公转。在自身复杂的运动特点和动力学本质以及多变的环境激励的综合作用下，行星齿轮箱振动信号的成分复杂性、时变性以及调制特征非常明显。

目前，振动测试分析仍然是机械故障诊断中的常用手段之一。但是，行星齿轮箱振动信号的复杂时变调制特征增加了振动信号分析和故障诊断的难度，使得行星齿轮箱故障诊断成为机械装备运行维护中的难点问题之一。同时，该问题近年来也受到了科技人员密切关注，成为机械故障诊断领域中的研究热点之一。目前，虽然已经出版了多部定轴齿轮箱故障诊断方面的专著，但是涉及行星齿轮箱故障诊断方面的著作还很少。许多科技工作者都希望透彻理解并掌握行星齿轮箱故障的振动征兆规律和相应的信号分析方法。

近年来，作者有幸获得国家自然科学基金(项目编号：50705007, 51075028, 51075224, 11272047, 51335006, 51475038)、教育部新世纪优秀人才支持计划(项目编号：NCET-12-0775)、北京市自然科学基金(项目编号：3102022)和中央高校基本科研业务费专项资金的资助。结合这些项目，针对行星齿轮箱故障诊断中存在的一些关键问题，作者对现代信号处理方法及其在复杂振动信号分析中的应用进行了探索研究，取得了一些成果。本书是在作者多年研究成果的基础上整理而成的，希望能够为从事机械设备状态监测与故障诊断、设备管理与维护等工作的广大科学研究、工程技术人员和研究生提供有益的参考和借鉴，从而起到抛砖引玉的作用。

本书具有以下特点：

(1) 针对行星齿轮箱故障诊断这一热点问题，汲取国内外该领域的最新研究成果，总结作者近年来在复杂振动信号处理方法及其在行星齿轮箱故障诊断中的应用方面的研究成果，内容具有先进性和新颖性。

(2) 内容安排由浅入深, 章节衔接前后连贯, 写作力求易读易懂。针对行星齿轮箱的动力学特点, 结合振动信号模型进行理论分析, 阐述各种分析方法的原理, 推导故障征兆规律, 并通过数值仿真、实验模拟以及现场测试信号分析进行说明和验证。

(3) 面向应用, 实用性强。针对行星齿轮箱太阳轮、行星轮、齿圈和行星轮轴承等关键零部件, 考虑齿轮和轴承振动信号的调制特征, 充分发挥各种常见信号处理方法的优点, 提出故障特征提取的解决方案, 方法思路独特, 但是原理简单, 算法容易实现, 而且结合实际数据分析进行说明阐述, 分析过程容易理解掌握。

本书第 1 章由褚福磊完成, 第 2、3、4、5、7、8 章由冯志鹏完成, 第 6 章由左明健完成, 全书由冯志鹏统稿。在书稿准备过程中, 研究生陈小旺和马浩群做了大量工作。

由衷感谢国家自然科学基金委员会、教育部和北京市自然科学基金委员会的资助, 同时感谢学术界同仁的一贯支持和热情帮助。

由于作者水平有限, 加之时间仓促, 书中不妥之处在所难免, 诚恳地欢迎广大读者批评指正。

作 者

2014 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 行星齿轮箱的结构原理和特点	1
1.1.1 行星齿轮传动	1
1.1.2 行星齿轮传动的特点	2
1.2 行星齿轮箱故障诊断研究进展	3
1.2.1 振动信号的复杂性	3
1.2.2 故障诊断方法研究进展	4
参考文献	5
第 2 章 齿轮分布式故障 Fourier 频谱分析	9
2.1 振动信号模型	9
2.1.1 啮合点处振动信号模型	10
2.1.2 行星轮通过效应	11
2.1.3 振动测试信号模型	12
2.2 故障特征频率计算	12
2.3 振动信号 Fourier 频谱特征	13
2.4 实验信号分析	16
2.4.1 实验说明	16
2.4.2 Fourier 频谱分析	17
参考文献	19
第 3 章 齿轮局部故障 Fourier 频谱分析	21
3.1 振动信号模型	21
3.1.1 啮合点处振动信号模型	21
3.1.2 传递路径对振动测试信号的影响	23
3.1.3 太阳轮局部故障振动测试信号模型	25
3.1.4 行星轮局部故障振动测试信号模型	25
3.1.5 齿圈局部故障振动测试信号模型	26
3.2 故障特征频率计算	26

3.2.1	太阳轮	26
3.2.2	行星轮	27
3.2.3	齿圈	27
3.3	振动信号 Fourier 频谱特征	27
3.3.1	太阳轮局部故障	27
3.3.2	行星轮局部故障	28
3.3.3	齿圈局部故障	29
3.4	实验信号分析	30
3.4.1	实验说明	30
3.4.2	Fourier 频谱分析	32
	参考文献	38
第 4 章	齿轮故障幅值解调分析	40
4.1	振动信号包络谱特征	40
4.1.1	分布式故障	41
4.1.2	局部故障	41
4.1.3	仿真信号分析	43
4.2	实验信号分析	45
4.2.1	正常状态	45
4.2.2	太阳轮故障	46
4.2.3	行星轮故障	47
4.2.4	齿圈故障	47
	参考文献	48
第 5 章	齿轮故障频率解调分析	50
5.1	振动信号频率解调谱特征	50
5.2	频率解调分析方法	51
5.2.1	基于经验模式分解的单分量分解	51
5.2.2	瞬时频率计算	53
5.2.3	分析过程	53
5.2.4	仿真信号分析	53
5.3	实验信号分析	55
5.3.1	正常状态	55
5.3.2	太阳轮故障	57
5.3.3	行星轮故障	58
5.3.4	齿圈故障	59

参考文献	60
第 6 章 齿轮故障扭转振动分析	62
6.1 扭转振动信号模型	62
6.2 故障征兆规律	63
6.2.1 Fourier 频谱分析	63
6.2.2 解调分析	65
6.3 实验信号分析	66
6.3.1 实验说明	66
6.3.2 信号分析	67
参考文献	71
第 7 章 时变工况齿轮故障诊断	73
7.1 时频分析方法	73
7.1.1 线性时频表示	73
7.1.2 双线性时频分布	74
7.2 仿真信号分析	78
7.3 实验信号分析	81
7.3.1 实验说明	81
7.3.2 信号分析	83
7.4 现场测试信号分析	86
7.4.1 运行参数	87
7.4.2 信号分析	87
参考文献	89
第 8 章 行星轮轴承故障诊断	91
8.1 振动信号模型	91
8.1.1 行星轮轴承运转特点	91
8.1.2 损伤点处振动信号模型	92
8.1.3 外圈局部故障振动测试信号模型	93
8.1.4 滚动体局部故障振动测试信号模型	97
8.1.5 内圈局部故障振动测试信号模型	97
8.2 故障特征频率计算	98
8.2.1 轴承元件旋转频率	98
8.2.2 轴承元件故障特征频率	99
8.3 Fourier 频谱分析	99

8.3.1	外圈局部故障	99
8.3.2	滚动体局部故障	101
8.3.3	内圈局部故障	103
8.3.4	实验信号分析	104
8.4	幅值解调分析	110
8.4.1	外圈局部故障	111
8.4.2	滚动体局部故障	112
8.4.3	内圈局部故障	113
8.4.4	实验信号分析	113
8.5	频率解调分析	115
8.5.1	频率解调谱特征	116
8.5.2	分析过程	116
8.5.3	实验信号分析	117
	参考文献	122

第 1 章 绪 论

行星齿轮箱结构紧凑，体积小，质量轻，传动比大，承载能力强，传动平稳，传动效率高，适用于高速大功率以及低速大扭矩的机械传动，广泛应用于机床、车辆、船舶、直升机、风力发电、石油化工和冶金矿山等各个领域^[1]。

在实际运行过程中，行星齿轮箱常承受复杂的动态重载作用力，容易出现机械故障。例如，车辆、直升机和风力发电机组常采用行星齿轮箱作为动力传动系统中的变速机构，它不仅承受动态重载负荷，而且运行工况变化频繁，是整个动力传动链中的薄弱环节，其中太阳轮、行星轮、齿圈和轴承等关键零部件容易出现磨损或损伤。作为变换扭矩和转速的关键环节，行星齿轮箱一旦出现故障，轻则导致整个动力传动链失效停机，重则导致机毁人亡。因此，行星齿轮箱故障诊断问题不容忽视。

本章介绍行星齿轮箱的基本结构、工作原理和特点，以及国内外关于行星齿轮箱故障诊断方法方面的研究进展。

1.1 行星齿轮箱的结构原理和特点

1.1.1 行星齿轮传动

在常见的定轴齿轮传动中，当齿轮系运转时，所有齿轮的几何轴线位置都固定不动，如图 1-1 所示。

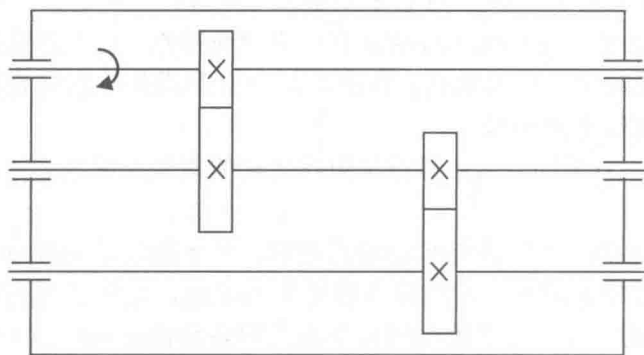


图 1-1 定轴齿轮传动结构示意图

在行星齿轮传动中,当齿轮系运转时,所有齿轮中至少有一个齿轮的几何轴线位置不固定,而是围绕其他齿轮的几何轴线旋转。在图 1-2 中,太阳轮和行星架均绕固定的几何轴线 $\overline{O_s O_c}$ 转动,而行星轮活套在行星架上,它一方面绕自身的几何轴线 $\overline{O_p}$ 自转,另一方面还随行星架绕固定的几何轴线 $\overline{O_s O_c}$ 公转,即做行星运动。因此,将这种齿轮传动称为行星齿轮传动。

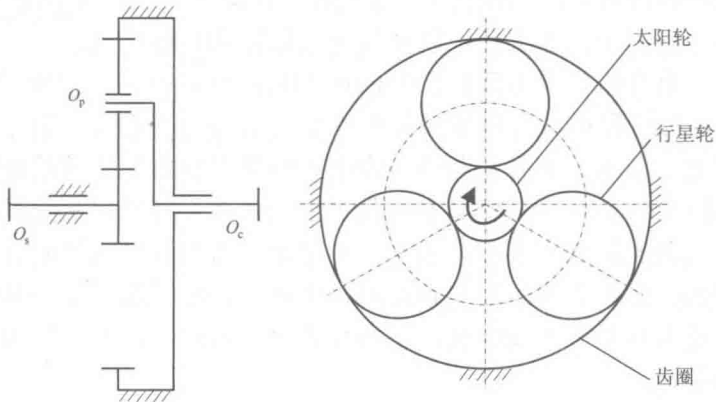


图 1-2 行星齿轮传动结构示意图

通常,行星齿轮传动的自由度为1,只要其中一个构件的运动已知,其余各构件的运动便可确定。在实际应用中,齿圈固定不动而太阳轮和行星架转动的行星齿轮箱最为常见,本书即研究这一类行星齿轮箱的振动故障诊断问题。

1.1.2 行星齿轮传动的特点

与普通的定轴齿轮传动相比,行星齿轮传动具有以下独特优点^[1]:

(1) 结构紧凑,体积小,质量轻。太阳轮、齿圈和行星架的几何中心线同轴,可以充分利用齿圈内部空间,有利于缩小外廓尺寸。

(2) 承载能力强。行星齿轮传动具有功率分流特点,在太阳轮和齿圈的周围均匀分布若干行星轮共同承担载荷,而且可以充分利用齿轮内啮合的承载能力,因此允许齿轮采用较小的模数。

(3) 传动比大。通过适当选择行星齿轮传动的类型及配齿方案,即可以获得很大的传动比。

(4) 传动效率高。行星齿轮传动结构对称,若干行星轮匀称分布,使得作用在支承太阳轮和行星架轴承上的作用力能够互相平衡,有利于提高传动效率。

(5) 运行平稳。若干行星轮均匀分布在太阳轮和齿圈的周围,使得行星轮与行星架的惯性力相互平衡,另外,同时参与啮合的齿数增多,使得行星齿轮传动运行平稳,振动冲击噪声小。

行星齿轮传动的上述诸多优点,使得它的适用范围广泛,不仅能够满足高速大功率的传动要求,而且适合低速大扭矩的传动场合,因此在各种机械装备中得到普遍应用。

1.2 行星齿轮箱故障诊断研究进展

1.2.1 振动信号的复杂性

振动测试分析是目前机械故障诊断中最为常用的方法之一,但是行星齿轮箱振动信号具有复杂的时变调制特征,致使故障诊断存在较大难度。

行星齿轮箱通常由太阳轮、行星轮、齿圈和行星架等关键部件组成,其中行星轮同时与太阳轮和齿圈接触啮合。若齿圈固定,太阳轮旋转,则行星轮在自转的同时还随行星架围绕太阳轮公转。行星齿轮箱在自身复杂的运动特点和动力学本质以及多变的环境激励的综合作用下,它的振动测试信号的复杂性、时变性以及调制特征非常明显。行星齿轮箱振动信号的复杂多样性不仅意味着信号成分复杂——既有各个零部件的特征频率成分,还有动力输入和负载设备的振动耦合信号成分,以及背景噪声干扰等成分,而且还体现在信号波形的变化形态各异——既有简谐波和冲击特征,还有多分量调制特征甚至时变调制特征。

(1) 信号成分复杂:振动信号中包含行星齿轮箱运行过程中的特征频率成分,如太阳轮或齿圈、行星轮、行星架的旋转频率;太阳轮-行星轮、行星轮-齿圈之间的啮合频率;上述频率成分的谐频成分;成组出现在啮合频率及其倍频附近的边带成分。支承太阳轮、行星轮和行星架的轴承和动力输入输出装置(如电机或联轴器)等零部件的特征频率成分经过多界面耦合传播之后,也会出现在测试信号中。

(2) 信号具有较强的非平稳性和调制特征:在运行过程中,为配合实际设备运行工况的变化切换(如起停机、升降速和增减负荷等瞬态过程),行星齿轮箱的转速和扭矩相应变化,振动信号的频率和幅值具有明显的时变性,即调频和调幅特征。在行星齿轮箱的运行过程中,位置固定的传感器(通常安装在固定的齿圈或者和齿圈相连的箱体上)和齿轮啮合(太阳轮-行星轮、行星轮-齿圈)振动源之间的相对运动会对振动测试信号产生明显的幅值调制作用,使得信号具有非平稳性。行星齿轮箱故障,如齿轮和轴承的点蚀、脱落和裂纹等局部损伤,在运行过程中会导致冲击响应,这些瞬态冲击成分将增加振动信号的非平稳性。

行星齿轮箱振动信号的复杂性和时变调制特征增加了信号分析和故障诊断的难度。针对这一问题,结合行星齿轮箱的动力学特点,深入透彻理解故障振动机

理, 总结归纳故障征兆规律, 提出有效的分析方法, 对于行星齿轮箱故障诊断具有重要的学术价值和实际应用价值。

1.2.2 故障诊断方法研究进展

对于定轴齿轮箱故障诊断, 广大科研人员开展了长期深入的研究。在时域内, 应用有效值、能量比、峰值因数、偏度、峭度以及基于残余信号和高阶统计量定义的多项统计参数指标识别齿轮损伤, 提出了时间同步平均分析方法^[2,3]。在频域内, 应用频谱分析、边带分析、包络谱分析和倒谱分析等方法从振动信号中提取特征频率, 从而识别齿轮故障原因^[2-6]。另外, 考虑齿轮箱振动信号复杂性和时变特点, 研究了基于小波变换、Cohen 类时频分布、Hilbert-Huang 变换、循环平稳分析和盲源分离等多种诊断方法^[7-16]。虽然这些关于定轴齿轮箱方面的研究成果对于行星齿轮箱故障诊断具有重要的参考借鉴价值, 但是, 行星齿轮箱的独特结构和运动特点使得其振动信号比定轴齿轮箱更为复杂, 故障诊断难度较大, 仍然存在许多问题值得深入研究。

针对行星齿轮箱振动信号的复杂特点, 一些学者应用各种信号分析方法对故障特征提取问题进行了研究^[17, 18]。

McFadden^[19]、McNames^[20]、Mosher^[21]研究发现, 在行星齿轮箱运行过程中, 行星轮-太阳轮以及行星轮-齿圈之间的啮合造成的振动更为复杂, 行星轮和位置固定的传感器之间的相对运动会产生调制作用, 行星轮之间的不同相位关系导致振动信号的频谱结构具有明显的非对称性, 即主导频率成分通常为分布在啮合频率及其谐频附近的边带成分。McFadden^[22, 23]以及 Samuel 和 Pines^[24]等推广了时间平均方法, 分别提出了利用单传感器和多传感器分离行星轮和/或太阳轮振动成分的计算方法。Samuel 等^[25]基于提升小波方法提出了约束自适应算法检测行星齿轮机构中的轮齿损伤, 以预先确定的行星齿轮箱正常状态下的振动信号作为小波基函数, 匹配振动信号, 检测其中的变化。Williams 和 Zalubas^[26]应用 Wigner-Ville 分布检测直升机行星齿轮传动系统故障。Bartelmus 和 Zimroz^[27, 28]发现行星齿轮箱故障对载荷变化敏感, 应用齿轮啮合振动幅值与工况之间的线性依赖关系监测时变工况下的行星齿轮箱运行状态。Barszcz 和 Randall^[29]应用谱峭度检测风电行星齿轮传动系统中的轮齿裂纹。Zhang 等^[30-32]应用盲解卷积方法降低振动信号中的干扰噪声, 提取行星架裂纹故障特征。Lei 等^[33]应用自适应随机共振方法提取行星齿轮传动系统微弱故障特征, 诊断了太阳轮剥落和断齿故障。胡莒庆等^[34, 35]提出了基于 Hilbert-Huang 变换的啮合频率邻域内能量特征以及灰色关联度分析方法检测行星齿轮传动系统中的太阳轮故障。樊长博等^[36]针对风电行星齿轮传动系统运行环境恶劣、故障信号中调制边频带复杂的问题, 应用倒频谱分析了故障特征。白亚红等^[37]提出了基于经验模式分解和支持向量机的诊断

方法,诊断了行星齿轮传动系统齿轮磨损故障。肖志松等^[38,39]针对自行火炮中的行星齿轮传动系统故障,分别提出了基于时域平均、时频分析、Hilbert-Huang变换和散度指标的诊断方法。

本书作者针对行星齿轮箱故障诊断中涉及的振动信号分析方面的问题进行了深入研究,根据行星齿轮箱的动力学特点,考虑典型零部件的常见故障形式,建立了太阳轮、行星轮和齿圈分布式故障和局部故障以及行星轮轴承故障状态下的振动信号模型,推导了太阳轮、行星轮和齿圈分布式故障和局部故障以及行星轮轴承内外圈和滚动体故障特征频率的计算公式,并推导了振动信号 Fourier 频谱的解析表达式,提出了幅值解调和频率解调分析方法,总结归纳了太阳轮、行星轮和齿圈等全部三种齿轮分布式故障和局部故障以及行星轮轴承内外圈和滚动体故障的征兆规律;针对工程实践中常见的时变工况,提出了基于时频分析的故障诊断方法,通过实验和现场测试信号验证了理论分析方法的有效性^[40-46]。

本书总结介绍作者在行星齿轮箱故障振动信号特征分析方面的研究成果:第2章和第3章在行星齿轮箱振动信号模型的基础上,分别介绍太阳轮、行星轮和齿圈分布式故障和局部故障特征频率的计算方法和振动信号的 Fourier 频谱特征;第4章和第5章针对齿轮振动信号的调幅-调频特征,分别提出幅值解调和频率解调分析方法用于齿轮故障特征提取;第6章通过扭转振动信号分析提取齿轮故障特征;第7章针对工程中常见的时变工况,介绍齿轮故障特征的时频分析方法;第8章针对行星轮轴承的独特运动方式,推导行星轮轴承故障特征频率的计算公式,总结归纳内外圈和滚动体等关键元件故障振动信号的 Fourier 频谱、幅值解调谱和频率解调谱的征兆规律。

参 考 文 献

- [1] 饶振纲. 行星齿轮传动设计. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [2] 丁康, 李巍华, 朱小勇. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [3] Samuel P D, Pines D J. A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, (282): 475-508
- [4] Randall R B. A new method of modeling gear faults. *Journal of Mechanical Design*, 1982, (104): 259-267
- [5] Randall R B. Cepstrum analysis and gearbox fault diagnosis. *Maintenance Management International*, 1982, 3(3): 183-208
- [6] McFadden P D. Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration. *Journal of Vibration Acoustics Stress and Reliability in Design-Transactions of the ASME*, 1986, (108): 165-170

- [7] Wang W J, McFadden P D. Application of orthogonal wavelets to early gear damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1995, (9): 497-507
- [8] Wang W J, McFadden P D. Application of wavelets to gear box vibration signals for fault detection. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, (192): 927-937
- [9] Meltzer G, Dien N P. Fault diagnosis in gears operating under non-stationary rotational speed using polar wavelet amplitude maps. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, 18(5): 985-992
- [10] Staszewski W J, Worden K, Tomlinson G R. Time-frequency analysis in gearbox fault detections using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition. *Mechanical System and Signal Processing*, 1997, (11): 673-692
- [11] Loutridis S J. Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition. *Engineering Structures*, 2004, (26): 1833-1841
- [12] Loutridis S J. Instantaneous energy density as a feature for gear fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, (20): 1239-1253
- [13] Parey A, Badaoui M EI, Guillet F, et al. Dynamic modelling of spur gear pair and application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, (294): 547-561
- [14] Capdessus C, Sidahmed M, Lacoume J L. Cyclostationary process: application in gear faults diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, 14(3): 371-385
- [15] Zhu Z K, Feng Z H, Kong F R. Cyclostationarity analysis for gearbox condition monitoring: Approaches and effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005, (19): 467-482
- [16] Roan M J, Erling J G, Sibul L H. A new, non-linear, adaptive, blind source separation approach to gear tooth failure detection and analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2002, 16(5): 719-740
- [17] 雷亚国, 何正嘉, 林京, 等. 行星齿轮箱故障诊断技术的研究进展. *机械工程学报*, 2011, 47(19): 59-67
- [18] Lei Y, Lin J, Zuo M J, et al. Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: a review. *Measurement*, 2014, (48): 292-305
- [19] McFadden P D, Smith J D. An explanation for the asymmetry of the modulation sidebands about the tooth meshing frequency in epicyclic gear vibration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1985, 199(C1): 65-70
- [20] McNames J. Fourier series analysis of epicyclic gearbox vibration. *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, 2002, (24): 150-152

- [21] Mosher M. Understanding vibration spectra of planetary gear systems for fault detection. Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences, 2003: 1-8
- [22] McFadden P D. A technique for calculating the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and the sun gear in an epicyclic gearbox. Journal of Sound and Vibration, 1991, 144(1): 163-172
- [23] McFadden P D. Window functions for the calculation of the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and sun gear in an epicyclic gearbox. Journal of Vibration and Acoustic, 1994, 116(2): 179-187
- [24] Samuel P D, Pines D J. Vibration separation methodology for planetary gear health monitoring. Proceedings of SPIE, 2000, 3985(250): 250-260
- [25] Samuel P D, Pines D J. Constrained adaptive lifting and the CAL4 metric for helicopter transmission diagnostics. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(1/2): 698-718
- [26] Williams W J, Zalubas E J. Helicopter transmission fault detection via time-frequency, scale and spectral methods. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(4): 545-559
- [27] Bartelmus W, Zimroz R. Vibration condition monitoring of planetary gearbox under varying external load. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, (23): 246-257
- [28] Bartelmus W, Zimroz R. A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operation conditions. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, (23): 1528-1534
- [29] Barszcz T, Randall R B. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, (23): 1352-1365
- [30] Zhang B, Khawaja T, Patrick R, et al. Blind deconvolution denoising for helicopter vibration signals. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(5): 558-565
- [31] Zhang B, Khawaja T, Patrick R, et al. Application of blind deconvolution denoising in failure prognosis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(2): 303-310
- [32] Zhang B, Khawaja T, Patrick R, et al. A novel blind deconvolution de-noising scheme in failure prognosis. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2010, 32(1): 3-30
- [33] Lei Y, Han D, Lin J. Planetary gearbox fault diagnosis using an adaptive stochastic resonance method. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, (38): 113-124
- [34] 冯占辉, 胡芑庆, 程哲. 基于时频域状态指标的行星齿轮断齿故障检测. 机械科学与技术, 2010, 29(6): 701-704
- [35] 程哲, 胡芑庆, 高经纬. 基于物理模型和灰色理论的行星轮系胶合损伤定量检测方法. 振动工程学报, 2011, 24(2): 199-204

- [36] 樊长博, 张来斌, 殷树根, 等. 应用倒频谱分析法对风力发电机组齿轮箱故障诊断. 科学技术与工程, 2006, 6(2): 187-189
- [37] 白亚红, 王奉涛. EMD 分解和支持向量机技术在风电齿轮箱早期齿轮磨损故障诊断中的应用. 工业控制计算机, 2010, 23(2): 70-71
- [38] 肖志松, 唐力伟, 王虹, 等. 时域平均在行星齿轮箱故障诊断的应用. 河北工业大学学报, 2003, 32(6): 99-102
- [39] 肖志松, 唐力伟, 王虹, 等. 行星齿轮箱中齿轮故障模式判别. 振动与冲击, 2005, 24(3): 125-127
- [40] Feng Z, Zuo M J. Vibration signal models for fault diagnosis of planetary gearboxes. Journal of Sound and Vibration, 2012, (331): 4919-4939
- [41] Feng Z, Liang M. Complex signal analysis for wind turbine planetary gearbox fault diagnosis via iterative atomic decomposition thresholding. Journal of Sound and Vibration, 2014, (333): 5196-5211
- [42] Feng Z, Zuo M J, Qu J, et al. Joint amplitude and frequency demodulation analysis based on local mean decomposition for fault diagnosis of planetary gearboxes. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, (40): 56-75
- [43] Feng Z, Zuo M J. Fault diagnosis of planetary gearboxes via torsional vibration signal analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, (36): 401-421
- [44] Feng Z, Chen X, Liang M. Iterative generalized synchrosqueezing transform for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, (52-53): 360-375
- [45] Feng Z, Liang M, Zhang Y. Fault diagnosis for wind turbine planetary gearboxes via demodulation analysis based on ensemble empirical mode decomposition and energy separation. Renewable Energy, 2012, (47): 112-126
- [46] Feng Z, Liang M. Fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions via adaptive optimal kernel time-frequency analysis. Renewable Energy, 2014, (66): 468-477