

基于振动信号的 滚动轴承智能健康管理

李 川 梁 明 陈志强 白 云◎著



科学出版社

基于振动信号的滚动 轴承智能健康管理

李 川 梁 明 陈志强 白 云◎著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书基于振动状态监测信号,以滚动轴承作为设备维护对象,通过实验验证、仿真评估与理论分析相结合的方法,深度剖析了基于多信息融合的滚动轴承健康监测管理、基于数学形态学的滚动轴承健康监测管理、基于广义同步挤压变换的滚动轴承健康监测管理。

本书适合人工智能、机械工程、可靠性管理等相关学科的高校师生阅读,也可供从事工业工程、设备健康管理、故障诊断、信号处理、工业大数据等领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于振动信号的滚动轴承智能健康管理/李川等著. —北京:科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-058100-6

I. ①基… II. ①李… III. ①滚动轴承—故障诊断 IV. ①TH133.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 134121 号

责任编辑:郭勇斌 邓新平 / 责任校对:王晓茜

责任印制:张 伟 / 封面设计:蔡美宇

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 189 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着制造业的不断发展,全球制造业格局面临着重大变革。在国际上,美国、德国、日本等发达国家都公布了工业 4.0 等不同版本的制造业创新战略计划。我国于 2015 年发布的《中国制造 2025》详细提出了智能制造的整体发展规划。随着新一代信息技术与制造业的发展,智能化与工业化的深度融合已经成为智能制造的主要突破口。设备健康管理是制造业的核心内容,但制造业的人力、物力资源不可能无穷尽地投入到设备管理,因此新时期的制造业对设备维护具有智能健康监测管理的新要求。

故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)是智能制造的核心技术,也是制造业发展的重要方向之一。本书针对智能制造健康管理的基本问题,以旋转机械设备中的核心部件滚动轴承的健康监测管理为主要研究对象,开展基于振动信号的滚动轴承健康监测管理研究,实现信息技术与设备健康管理深度融合,可以为故障预测与健康管理的智能制造领域的科技创新提供支撑。

本书共分为 5 章。第 1 章为绪论,指出了滚动轴承健康监测管理的目的和意义,对轴承健康监测管理的技术做了初步的介绍;第 2 章介绍了滚动轴承的健康退化机制,并简要介绍了退化过程的振动特征分析方法;第 3 章介绍了轴承健康监测管理的多信息融合方法,在此基础上通过最优解调识别轴承的健康状态;第 4 章介绍了基于数学形态学的滚动轴承健康监测管理,具体介绍了基于形态小波的振动信号切片分析方法、连续尺度数学形态学方法等在滚动轴承健康监测管理中的应用;第 5 章介绍了基于振动信号广义同步挤压变换的智能监测方法,在同步挤压变换及其广义拓展的基础上,将其应用到变速条件下的轴承健康监测管理。

本书由李川、梁明、陈志强和白云共同撰写,其中第 1 章和第 2 章由陈志强负责,第 3 章由李川负责,第 4 章由梁明和李川负责,第 5 章由白云负责,全书由李川和梁明统稿。相关老师、博士后和研究生参与了本书的整理和校对,东莞理工学院的广东省智能制造系统健康监测维护工程技术研究中心为本书的成稿提供了支持,中国、加拿大、葡萄牙、厄瓜多尔的多位专家为本书的内容提出了重

要的建议和意见，在此向他们一并表示感谢。

本书的研究工作获得国家自然科学基金项目（51775112，51375517）、国家重点研发计划项目（2016YFE0132200）和中国博士后科学基金项目（2016M602459）等的资助，特此感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2017年11月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 滚动轴承健康监测管理的目的和意义	1
1.2 滚动轴承健康监测管理的研究内容	2
1.3 滚动轴承健康监测管理分类	4
1.4 滚动轴承健康监测管理的发展历程	8
1.5 基于振动信号的滚动轴承智能健康监测管理研究现状	10
参考文献	12
第 2 章 滚动轴承健康退化的振动特征	15
2.1 滚动轴承的健康退化类型	15
2.2 滚动轴承运行的振动发生机制	17
2.3 振动信号的状态特征	23
2.4 小结	34
参考文献	35
第 3 章 基于多信息融合解调的轴承健康监测管理	37
3.1 信息融合简介	37
3.2 多指标模糊融合条件下轴承健康状态智能监测	38
3.3 信息负熵多尺度灰色聚类识别轴承故障	51
3.4 小结	74
参考文献	75
第 4 章 基于数学形态学的滚动轴承智能健康监测技术	77
4.1 数学形态学简介	77
4.2 滚动轴承振动信号多尺度自相关形态平稳小波分析	78

4.3 连续尺度数学形态学方法智能监测滚动轴承健康状态·····	102
4.4 小结·····	124
参考文献·····	125
第5章 基于振动信号广义同步挤压变换的滚动轴承智能健康监测·····	128
5.1 广义同步挤压变换原理·····	128
5.2 基于广义同步挤压变换的滚动轴承智能健康监测·····	139
5.3 仿真信号分析·····	145
5.4 实验验证评估·····	150
5.5 小结·····	158
参考文献·····	159

第1章 绪 论

1.1 滚动轴承健康监测管理的目的和意义

滚动轴承的健康监测管理问题得到重点关注,是因为滚动轴承作为承受载荷和传递载荷的重要部件,是各类装备中具有重要作用的基础关键件。国务院颁发的《关于加快振兴装备制造业的若干意见》提出,以关键领域的重大技术装备和产品为重点,实现重大突破,振兴装备制造业。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》^[1]定义的优先主题及其重点领域中,“基础件和通用部件”“高速轨道交通系统”“高效运输技术与装备”“交通运输安全与应急保障”都被列为国家重点鼓励发展的领域。这些关键领域的重大技术装备和产品,大部分都需要高精度的、可靠性强的滚动轴承。另外,滚动轴承广泛应用于许多关系国计民生的重要行业,如交通运输、河海运输、航天航空、机械制造、化学工业、军事工业、钢铁冶金、石油开采与冶炼等领域^[2]。

在旋转机械设备中,滚动轴承是最容易损坏的部件之一。旋转机械设备中,滚动轴承的故障大约占总故障的30%^[3];电机故障中,40%的故障源于电机中的滚动轴承故障^[4,5];齿轮箱系统中,轴承故障率仅次于齿轮故障率,大约占20%^[3,4];我国每年约有40%的机车,所使用滚动轴承要经过下车检验,需要更换的滚动轴承约占下车检验轴承的33%^[2]。在现实生产生活中,由于机械设备失效引发重大事故时有发生。2014年,俄罗斯一架米-8直升机坠毁事故,调查结果显示是因为发动机故障;2005年,某300MW发电机因为转子裂纹而报废^[2,6]。

在铁路运行领域,2007年8月郑州铁路局管辖内的一列货运列车因轴箱轴承过热发生热切轴故障,导致列车脱轨遇险;同年9月,一列货运列车因轴箱轴承质量问题,导致一节车箱某轴发生热切^[7]。事实上,通过统计近几年来铁路部门的实际检修情况^[7],不难发现各型列车的滚动轴承,均可能出现不同程度的损伤。

上述事故表明,研究滚动轴承的健康监测管理问题,对保证设备运行安全和

人员安全、减少经济损失具有重要的意义。当前针对滚动轴承等关键零部件进行的在线辨识、诊断、预测和监控技术还不能完全满足装备制造业发展的需要,尤其是对于关键零部件的早期故障,因为信号微弱,难以发现。为了避免事故的发生,必须进一步建立和完善在线监控和预警系统,智能健康监测管理系统正是与之相匹配的应对策略之一^[7]。

随着制造业与新一代信息技术的深度融合,全球的制造业格局正面临重大调整,也将引发影响深远的产业变革。美国、德国、日本等都公布了各自的工业 4.0 战略计划。2015 年 5 月,我国印发《中国制造 2025》,对智能制造领域做出了整体规划,其中明确提出智能制造的主攻方向是信息化与工业化深度融合。设备维护与管理领域,经历了事后维修和定期检测等发展阶段后,正向可预测性维护快速推进,对滚动轴承等关键设备进行基于振动监测的智能健康监测管理,也是实现智能制造的迫切需求之一。

滚动轴承健康监测管理的主要目的是有效开展滚动轴承的可预测性维护,实现滚动轴承状态监测智慧化。在大数据驱动下,能够预测设备的故障时间及故障点,降低备件库存,把变化变成计划的一部分,使得维修成本大幅降低,为工业 4.0 和《中国制造 2025》等制造业创新战略背景下的智慧工厂添砖加瓦,推动智能制造的稳步实现。

1.2 滚动轴承健康监测管理的研究内容

滚动轴承健康监测管理是机械工程、数学、物理、电子技术、通信技术、计算机技术、工业工程等多学科融合的技术,滚动轴承的振动信号、噪声信号、温度信号、工作参数变量信号甚至气味信号都包含滚动轴承的健康状态。因此,可以通过监测滚动轴承在各种工况下表现出来的各种健康状态信号,如振动、噪声、温度、工作参数变量、气味、泄漏,然后通过信号分析和信息处理等综合技术手段,来对滚动轴承的健康状态、故障类型和故障严重程度进行综合评价。实际应用中,滚动轴承的健康监测管理也是围绕着振动、噪声、温度等信号进行研究的^[3, 5]。轴承状态监测过程一般包括三个步骤:首先是获取轴承状态信号,其次提取故障特征信息,最后通过模式识别等技术诊断故障状态,其流程如图 1-1 所示^[2]。

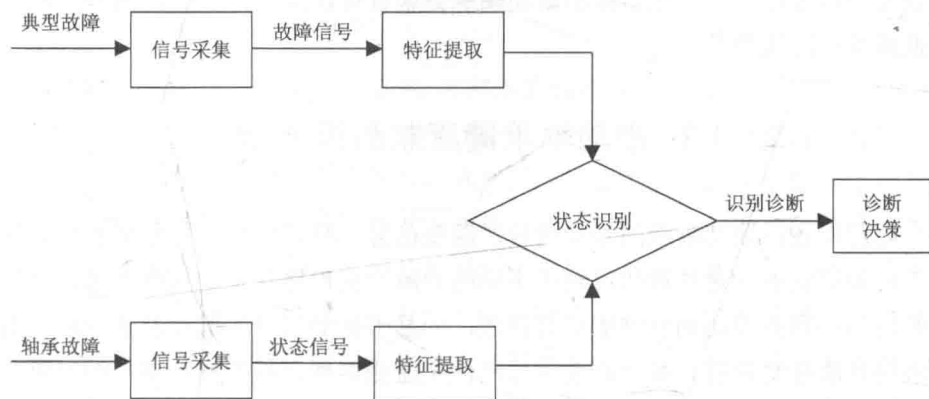


图 1-1 基于振动信号的滚动轴承健康监测管理的流程图

检测实验技术、信号处理与分析技术、故障模式识别技术及生命周期的预测评估技术是滚动轴承健康监测管理的主要技术手段。通过这些手段，可以达到如下目的^[3-5]：检测和发现存在的异常，诊断故障状态、位置及故障类型，最终提出可行的诊断方案和诊断结论。因此，滚动轴承健康监测管理的主要研究内容可以具体描述如下。

(1) 信号检测与采集，旨在获取能够反映轴承工作状态的信号。不同的滚动轴承的工作环境，有不同的信号采集方式和传感器的配置与安装。传感器检测装置检测到的信号通过高性能数据采集装置，采集滚动轴承状态信号如温度、位移、速度、振动等。其中，传感器和数据采集软硬件技术是研究的核心内容。

(2) 状态信号特征提取。利用高性能数据采集装置采集到的滚动轴承状态信号通常包含较多的干扰噪声。状态信号特征提取主要是利用信号处理与分析技术，去除噪声干扰，提取出能够反映轴承状态的有用特征信息。比如，噪声干扰下的信号的频域信息含有较多的复杂频率成分，需要从这些复杂频率成分中提取出有效的故障频率特征。作为健康监测的关键步骤，信号特征提取将直接影响故障模式识别的可靠性和准确性。信号特征提取通常有如下方式：时域特征提取、频域特征提取及时频域特征提取，除此之外还可以利用其他一些非线性参数来提取信号特征^[2]。

(3) 健康特征模式识别。基于提取的滚动轴承状态信号特征，采用智能管理等技术，识别滚动轴承的故障模式，进一步诊断故障的类型、部位，并分析故障产生原因^[8]。

(4) 决策干预。有了上述的诊断结果后，就可以对滚动轴承的运行状态、故

障发展趋势进行评估,然后做出滚动轴承健康管理决策,如调整、维修、控制、更换或继续监视等^[8]。

1.3 滚动轴承健康监测管理分类

如前所述,滚动轴承的振动信号、温度信号、噪声信号等都蕴藏着滚动轴承的工作健康状态。这些载体反映了不同的故障检测机理。基于这些载体,可以相应开发出不同的滚动轴承健康监测管理,如基于振动信号的健康监测管理、基于油液的健康监测管理、基于温度信号的健康监测管理、基于噪声信号的健康监测管理、基于油膜电阻的健康监测管理及基于光纤信号的健康监测管理等^[3, 9, 10]。

1.3.1 基于振动信号的健康监测管理

这是滚动轴承健康监测管理最常用的技术之一,与之相关的理论基础和实践应用都比较成熟,是实现滚动轴承在线监测的主要技术^[11]。通过采集运行过程中轴承的振动信号,然后对其进行时域、频域或时频域分析,提取相应特征,针对滚动轴承出现的典型故障如变形、压痕、疲劳剥落、局部腐蚀等进行状态监测与智能管理^[3]。滚动轴承的振动信号类型通常包括平稳振动信号、循环平稳振动信号、非平稳振动信号。相应振动信号的平稳性,又可以有针对性地开发出不同的振动信号滚动轴承故障诊断技术,其中时域分析法、频域分析法和时频域分析法是振动信号分析的主要手段。

1. 平稳振动信号分析

当滚动轴承在稳定状态下工作时,其振动信号多为平稳振动信号。傅里叶频谱分析方法是主要的平稳振动信号分析技术。傅里叶频谱分析将时域波形经过傅里叶变换转换成频谱图,采用振动信号的频谱特征(如特征频率、幅值、无量纲判别因子等)进行诊断分析。如果频谱图中有明显的故障频率波峰存在,则表示滚动轴承存在故障。傅里叶频谱分析对早期的轴承故障灵敏度不够,通常适用于轴承故障较严重的情形。另外一种常用的平稳振动信号分析技术是基于时间序列模型的统计参数分析。

除了上述两种技术之外,其他常用于滚动轴承平稳振动信号分析的方法有:倒频谱分析、时域平均方法、主成分分析技术、包络分析、细化谱技术、全息谱技术、双谱技术等^[3, 5],这些方法有效提高了信号分析的信噪比和性能。

2. 循环平稳振动信号分析

由于滚动轴承的结构具有对称性,其产生的振动信号中含有大量的周期成分,在一些工况下,滚动轴承振动信号的统计特征参量随时间呈现周期或多周期的变化规律。这是一种特殊的非平稳信号,具有循环平稳特性,因此被称为循环平稳振动信号。循环平稳振动信号的处理方法基于循环统计理论,最初的处理技术是将循环平稳振动信号分解为一组相关的平稳随机信号。后来随着二阶统计量的研究深入,基于二阶循环平稳理论的时间平滑周期图法、基于谱相关密度提取轴承故障特征信号的方法等被运用于滚动轴承故障诊断中。二阶统计量技术有效地降低了干扰信号和噪声对调制结果的影响,能够更好地提取故障特征,较准确地揭示故障成因,提高监测的准确性^[3,5]。高阶循环统计量诞生之后,很快应用到循环平稳振动信号的分析中^[12],如陈进等^[13]应用高阶循环统计量理论在旋转机械的故障特征提取和识别中,指出将高阶循环统计量应用于机械设备的故障诊断领域具有重要意义。

3. 非平稳振动信号分析

当滚动轴承发生故障时,在采集到的振动信号中存在瞬态冲击响应成分,这种成分表现出持续时间较短、频带较宽等特点,这种带有时变特性的信号称为非平稳振动信号。傅里叶变换虽然在稳定振动信号分析领域展现了优越的性能,但不能够有效处理非平稳振动信号。

为了识别非平稳振动信号的局部性能,时域和频域的二维联合表示即时频信号分析是非常必要的。常用的时频信号分析方法有短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)、自适应时频分析(Adaptive Time-Frequency Analysis, ATFR)、小波变换(Wavelet Transform, WT)、奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)、匹配追踪(Matching Pursuit, MP)、Wigner-Ville分布、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)算法等方法^[7]。

1.3.2 基于油液的健康监测管理

磨损、断裂、腐蚀是滚动轴承的主要故障形式,在所有机械系统中,互相接触的金属零件的相对运动都会发生磨损。运动副的表面磨损,会产生磨屑颗粒,这些颗粒处于悬浮状态并存在于机械的润滑系统中。高速运转的轴承,不可避免会发生磨损,相关的颗粒会随着冷却油或润滑油进入到循环油液中。因此对于那

些油冷却或者油润滑的轴承, 润滑油中金属粒子的数量也是轴承健康状态的重要指示器。监测和分析运行过程中的油液中的金属粒子数量, 就可以了解滚动轴承的运行状态, 进而推断出轴承故障的类型和位置^[14, 15]。

油中颗粒监测 (Oil Debris Monitor, ODM) 技术已经被应用于润滑油回路中金属颗粒的在线监测, 其技术原理如下^[16]: 在滚动轴承的回油线路上, 安装一个油中颗粒监测传感器, 该传感器作为油液的流动通道的一部分, 当金属颗粒通过传感器油路通道时, 会产生一个非平稳振动信号, 类似于脉冲信号, 通过分析这个非平稳振动信号, 可以获取颗粒特征。在实际监测环境中, 振动噪声和环境噪声是不可避免的, 这会干扰监测结果。因此在被噪声污染的传感信号中提取出颗粒特征信号, 是油液中金属颗粒污染物监测的关键技术之一^[17]。

另外一种普遍使用的油液诊断技术是铁谱监测技术^[3, 5]。该技术的原理如下: 通过定性观察和定量测试冷却或润滑油中的磨损磨粒在铁谱片上的分布, 来判断轴承的运行状态和磨损机理。铁谱监测仪器价格低廉、采集到的信息比较丰富, 但是依赖技术人员的经验, 不能及时预报突发性故障。常用的铁谱监测仪器有分析式铁谱仪、直读式铁谱仪和旋转式铁谱仪。

综合运用红外光谱分析、油液理化分析、发射光谱技术、铁谱分析、清洁度检测及 ODM 技术等, 可以有效地避免由于单一手段的局限性导致的误诊和漏诊现象^[3], 在滚动轴承故障诊断中发挥重要的作用。

1.3.3 基于温度信号的健康监测管理

温度是表示物体冷热程度的物理量, 也是物体分子运动平均动能大小的标志。因此温度是滚动轴承在运转过程中最基本的性能参数之一。设备零部件的工作状况如摩擦、碰撞、泄漏等, 都可反应在温度的变化和分布情况中。滚动轴承的载荷、摩擦力矩、转速、润滑剂黏度及轴承的运转状态, 都是影响轴承温度的重要因素^[3, 5], 因此可以通过测量轴承的温度来观察轴承的运转参数的变化和运行的故障^[10]。特别是对存在烧伤故障的滚动轴承, 轴承烧伤程度可以通过测量温度得到有效的反馈。

在工业生产中, 采用各种检测仪表来测量零部件的温度值或温度分布, 并通过温度的变化和分布情况分析, 可以确定其工作状态和诊断故障程度。温度监测在一定程度上能够防止热切轴的发生, 其应用最早, 并且已成为大多数轴承故障监测的标准配置。温度监测主要是针对温度变化明显的较严重故障检测, 对于微小故障如轴承所出现的轻微磨损和剥落、早期点蚀等并不敏感。因为存在微小故障的轴承温度的变化并不明显, 难以通过温度监测准确反应早期故障, 所以温度

监测一般作为保障轴承安全的辅助方法。

1.3.4 基于噪声信号的健康监测管理

滚动轴承诊断技术的第一阶段即是利用声学信号进行故障健康监测管理。最早利用设备发出的声音诊断轴承工作状态的装置是听音棒。听音棒的一端与轴承接触,另一端与工程师的耳朵接触,通过工程师的经验来判断设备正常与否。在诊断过程中,人的经验占据主导地位,其准确性往往因人而异,可靠性比较差。

近十年来,基于声发射(Acoustic Emission, AE)的故障诊断技术得到迅速发展。声发射指的是材料内部或表面因为损坏或变形,突然释放应变能发射的瞬态弹性波^[18]。轴承由于变形、剥落或裂纹等原因,会产生这种弹性波,声发射技术就是利用监测到的轴承弹性波来实现对轴承工况的诊断。旋转机械运行过程中,由于不平衡、热弯曲、不对中等因素,动静件之间会发生碰摩。随着旋转机械的运行效率日益提高,旋转机械动静件间的配合间隙也越来越小,这导致更加突出动静件间的碰摩。一旦碰摩发生,动静件碰摩处就会发生弹性变形,产生弹性波发射。典型声发射源来自变形和断裂机制有关的弹性波源。除此之外,撞击、流体泄漏、燃烧、摩擦、磁畴壁运转等是声发射的另一类来源,通常被称为二次声发射源^[19]。

声发射信号幅值的大小主要与碰摩时释放的能量直接相关,与振动状态关系不大,声发射信号蕴含了丰富的碰摩信息。在没有发生碰摩前,声发射信号中并不包含滚动轴承的不对中、不平衡等故障状态信息^[20, 21]。碰摩发生后,摩擦产生的声发射波穿过转子表面,可以到达轴承界面,通过声发射传感器,可以很容易被检测到。因此,声发射非常适合诊断实际机组运行过程中的动静件碰摩故障,特别对于检测和识别轻微滑动摩擦,其优势比较明显^[20, 21]。

经常受到交变载荷冲击作用的滚动轴承,容易产生塑性变形或错位运动。这个过程中,声发射信号伴随而生。这种滚动轴承产生的声发射信号有如下特点:频带通常较宽,发射频率可达几十甚至几百兆赫兹;信号的强度差异很小,通常只有几微伏,因此需要电荷放大器等辅助仪器进行放大^[3]。

采用声发射法对滚动轴承进行健康监测管理的主要优点如下^[8, 22-24]。一是声发射法能够实现早期预报和诊断故障。当轴承出现微裂纹时,在慢扩展阶段,难以引起轴承明显振动,但是已经产生比较明显的声发射信号。因此在工况完全相同的条件下,同时用振动信号和声发射信号监测轴承工作状态,声发射法能够比振动监测方法更早地识别故障。二是声发射信号的特征频率明显。声发射信号有较宽的频谱,比较而言,振动信号的频谱要窄得多。声发射信号高达几万赫兹以上的高频信号特性,可以有效抑制干扰,这大大提高了检测正确率。除此之外,

声发射检测装置体积小,抗干扰性好,可靠性高,使用方便,因此声发射法还非常适用于现场检测。不足之处是声发射法需要价格比较昂贵的专用设备,其推广应用受到了一定的限制。

1.3.5 基于油膜电阻的健康监测管理

润滑良好的轴承,滚动体和滚道间会形成油膜。在油膜的作用下,内、外圈之间的电阻高达几兆欧姆^[3,5]。如果破坏了滚道和滚动体之间的润滑油膜,那么内、外圈之间的电阻可降低至零欧姆。受此启发,只要能够测量滚动轴承内、外圈之间的电阻,就可以判断轴承是否存在异常。利用这一特性,有研究者开发了基于油膜电阻的健康监测管理技术,对滚动轴承的磨损、腐蚀类的损伤和润滑状态进行监测和诊断。该方法的局限性是,不适用于表面剥落、裂纹、压痕等异常的诊断,只适用于旋转轴外露的场合。

1.3.6 基于光纤信号的健康监测管理

基于光纤信号的健康监测管理技术是在光纤束制成的位移传感器的帮助下,直接从滚动轴承的套圈表明提取轴承工作状态信号的诊断技术。其实现的原理如下:位移传感器的光纤束包含发射光纤束和接收光纤束,光由发射光纤束发射,通过传感器端面和轴承套圈表面的间隙,然后再反射回来,由接收光纤束接收。接收到的光包含了轴承的工作状态,对接收到的光经光电元件转换成电信号。分析处理上述电信号,可以评估轴承工况。光纤位移传感器的灵敏度较高,可以直接从轴承表面提取轴承工况信号,因此该项技术提高了信噪比,能够直接反映滚动轴承的表面磨损程度、制造质量、承受载荷、润滑状态和裂纹间隙情况^[25]。该项技术适用于能够将光纤位移传感器安装在轴承座内的设备诊断。

1.4 滚动轴承健康监测管理的发展历程

前面所述的滚动轴承健康监测管理,随着科学技术和工业技术的迅速发展,各种健康监测管理方法不断产生、发展和完善,总体上经历了如下5个阶段^[26-28]。

第一阶段:诊断设备为听音棒等仪器仪表。采用听音棒来获取运行中的滚动轴承发出的声学信号,靠训练有素的人来诊断轴承的工作状态。诊断过程中,受听音者的主观因素的影响较大,诊断的准确性差,可靠性低。

第二阶段:诊断设备为频谱分析仪。通过振动信号的频谱分析来监测和诊断

滚动轴承健康状态。主要的频谱分析技术为快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT），该技术的出现推动了滚动轴承信号的频谱分析的发展。然而正如前所述，快速傅里叶变换仅适用于平稳振动信号，对非平稳振动信号效果很差。由于采集的振动信号背景噪声太大，频谱分析仪在进行频谱分析后得到的轴承故障特征频率不明显，加上频谱分析仪价格比较昂贵，并且需要掌握技术的专业人员来操作，频谱分析仪未得到广泛应用，这一阶段的轴承故障诊断技术还未真正走向实用化。

第三阶段：诊断设备为冲击脉冲计等。基于冲击脉冲技术监测和诊断滚动轴承的健康状态。当滚动轴承存在缺陷，如磨损缺陷、裂纹、疲劳剥落时，运行过程中会产生冲击，导致滚动轴承脉冲性振动，产生高频压缩波。瑞典 SPM 仪器公司利用此原理，开发了用于轴承故障诊断的冲击脉冲计，有效地检测出轴承早期损伤类故障，并且不需要进行频谱分析，使用灵活方便，得到广泛应用。目前，基于该原理的故障诊断设备已大量实现了工业应用。

第四阶段：诊断设备为共振解调分析系统。利用共振解调技术可以诊断滚动轴承的健康状态，在运行过程中，如果轴承元件表面有局部损伤类故障，如压痕、剥落、点蚀或裂纹，那么轴承损伤点会与其相接触的其他元件表面产生撞击，产生冲击力。该冲击力有如下特点：作用时间短，冲击信号频带宽。因此会激励轴承座、传感器、轴承等相关结构的共振。在阻尼作用下，上述共振在下次冲击力到来之前通常会衰减掉，从而形成一个由多个脉冲响应构成的脉冲链，并在轴承振动信号中得以体现^[17]。从复杂的振动信号中，利用共振解调技术提取脉冲响应特征，已广泛用于滚动轴承循环冲击类故障检测。该技术最先见于美国学者 D.R.Hacking 发明的专利“共振解调分析系统”。连续小波变换和离散小波变换都已被用作共振解调的滤波器^[29]。通过对振动信号进行放大、滤波，共振解调技术有效地提高了故障信号的信噪比。共振解调技术既要包络分析幅值信号，还要分析冲击引起的高频谐振的幅值，能够判断故障严重程度，以及故障发生的部位，结合包络频谱分析技术，可诊断早期的轻微故障^[26]。

第五阶段：诊断设备为信息技术驱动下的智能健康管理系统。计算机科学技术的高速发展，造就了计算机强大的信息处理能力。在强大的计算机计算能力驱动下，信号处理与分析技术得到了快速发展，人工智能广泛用于滚动轴承的故障诊断，神经网络、支持向量机、粗糙集、深度学习等先进的机器学习技术与故障诊断技术相结合，在数据驱动下实现滚动轴承的智能诊断。信息技术支撑下的滚动轴承智能健康管理系统更加灵活、智能、精确和迅速，在《中国制造 2025》背景下将得到更广泛的推广。

1.5 基于振动信号的滚动轴承智能健康监测管理研究现状

滚动轴承的健康监测管理系统通常包含三个阶段：故障识别（Fault Detection）、故障诊断（Fault Diagnosis）和剩余寿命预测（Remaining Useful Life Prediction）。相对而言，大多数研究者更多关注于前两个阶段。随着研究的深入和智能故障诊断的需求，剩余寿命预测也成为整个健康监测管理系统的有机组成部分。在滚动轴承的健康监测管理领域，Gustafsson 等采集轴承运行状态下的振动信号，然后将正常信号的幅值和收集的振动信号幅值进行对比来判断滚动轴承是否出现异常^[26]；Wheeler 和 Martin 通过频谱分析仪所得的结果与数学公式计算得到的振动频率来判断滚动轴承状态是否正常^[27-28]；Rao 等对利用人工神经网络方法进行滚动轴承故障诊断与分类的研究做了综述总结^[29]；包络分析技术被广泛应用于滚动轴承故障诊断中，Wang 等提出应用包络分析技术来进行故障诊断^[30]；Ho 等将自适应降噪技术与包络分析技术相结合，降低了噪声的干扰，能够更有效地提取出轴承故障特征信号，使得故障诊断结果更加精确^[31]；Li 等通过分析疲劳裂纹扩展模型和诊断模型间的映射关系，采用非线性递推最小二乘法，以预测轴承故障尺度的大小^[32]。

Li 等通过时域与频域分析和神经网络相结合的方式，对滚动轴承进行故障诊断^[33]。Antoni 在给出谱峭度图的定义后，又对谱峭度图的应用做了大量的研究，并将其应用于滚动轴承及齿轮的监测与故障诊断中，随后又提出快速谱峭度图算法^[34]，提高了谱峭度方法的实用性。Wang 提出一种自适应谱峭度方法并成功诊断了同一轴承多故障情况或不同设备同时有故障的情况^[35]。Guo 等将嵌入的经验模态分解（Embedded Empirical Mode Decomposition, EEMD）方法与谱峭度方法结合，首先对信号由谱峭度方法滤波后再做 EEMD，实验证明，这种方法在较强的噪声干扰情况下也能取得较好的轴承故障诊断效果^[36]。目前比较热门的技术是利用深度学习方法来实现故障诊断，例如，卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）^[37]、深度信念网络（Deep Belief Network, DBN）^[38]在齿轮箱的故障识别与诊断上，都取得了较好的实验效果。

滚动轴承的剩余寿命预测方法主要分为两类，一类是基于模型的，另一类是由数据驱动的^[39]。基于模型的方法是通过建立一个综合性的、可理解的数学模型来描述系统状态的内在演化规律。常用的模型有马尔可夫过程模型^[40]、Winner 过