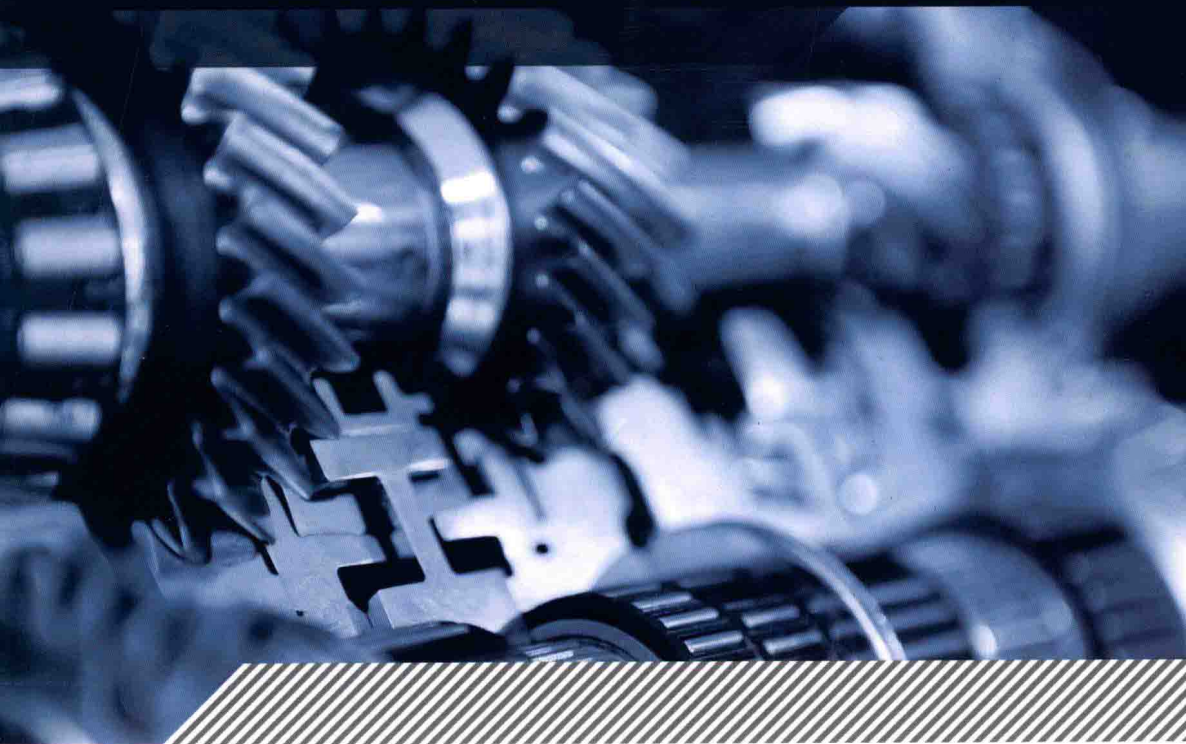




# 齿轮故障 智能诊断技术

陈志强 陈旭东 李川 梁明/著



科学出版社

# 齿轮故障智能诊断技术

陈志强 陈旭东 李川 梁明 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书基于振动信号和润滑油中颗粒信号,以齿轮箱作为设备维护对象,详细介绍了研究团队在齿轮故障智能诊断技术领域的研究成果。采取实验验证、仿真验证与理论分析相结合的方法,深度剖析了同步挤压变换方法在齿轮故障智能诊断领域的应用,系统评估了深度学习技术在齿轮故障识别中的应用,呈现了基于深度学习模型的齿轮故障智能诊断技术最新成果。

本书适合计算机科学、机械工程等相关学科的教师、研究生和高年级本科生阅读,也可供从事故障诊断、信号处理、工业大数据挖掘及深度学习研究的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

齿轮故障智能诊断技术/陈志强等著. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-058795-4

I. ①齿… II. ①陈… III. ①齿轮—故障诊断 IV. ①TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 210053 号

责任编辑: 郭勇斌 邓新平 / 责任校对: 崔向琳

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 众轩企划

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 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 223 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

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，也引发了影响深远的产业变革。美国、德国、日本等各自公布了不同的工业 4.0 战略计划。2015 年 5 月，国务院印发《中国制造 2025》，对智能制造领域作出了整体的要求和规划，提出以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向。设备管理是制造业的核心命脉，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，因此预测性维护将是制造业适应工业 4.0 的必由之路。

本书面向智能制造，以旋转机械设备中的核心部件齿轮的维护管理为研究对象，开展基于人工智能技术的齿轮故障预测性维护研究，将信息技术与设备管理进行深度融合。本书介绍的广义同步挤压变换方法，是信号的时频特征分析的有效手段；采用的深度学习技术，是当前机器学习领域的热点；呈现的润滑油中磨损颗粒信号分离技术和振动干涉信号再利用技术，都具有重要的应用价值和学术价值。

本书由陈志强、陈旭东、李川和梁明等共同撰写完成，其中第 1 章、第 2 章和第 4 章由陈志强撰写，第 3 章和第 5 章第 5.2 节由陈旭东撰写，第 5 章其他小节由李川撰写，全书由陈志强统稿，梁明对全书进行审核校正。作者团队中的相关老师和学生参与了本书有关内容的整理和校对，在此向他们一并表示感谢。

本书出版获得国家自然科学基金（项目编号：61502063）、重庆高校创新团队建设计划（项目编号：CXTDX201601025）和国家智能制造服务国际科技合作基地开发基金（项目编号：950216061）的资助，特此感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在一些不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2017 年 10 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 齿轮故障智能诊断概述	1
1.1.1 齿轮故障主要类型	2
1.1.2 齿轮故障诊断的发展过程	3
1.2 齿轮故障智能诊断的研究内容	5
1.2.1 齿轮故障机制研究	6
1.2.2 信号选择和检测机制研究	6
1.2.3 齿轮信号分析与处理方法研究	7
1.2.4 齿轮信号特征选择研究	7
1.2.5 齿轮故障诊断的智能决策方法研究	7
1.3 齿轮故障诊断方法	8
1.3.1 基于解析模型的齿轮故障诊断方法	8
1.3.2 基于信号分析与处理的齿轮故障诊断方法	8
1.3.3 基于知识的齿轮故障诊断方法	11
1.3.4 基于感知行为的齿轮故障诊断方法	15
1.4 小结	15
参考文献	15
第 2 章 齿轮故障信号的特征提取与选择	20
2.1 齿轮运行状态信号载体	20
2.1.1 振动信号	20
2.1.2 润滑油中颗粒信号	22
2.1.3 声发射信号	23
2.1.4 电流信号	24
2.1.5 温度信号	24
2.2 故障信号特征提取方法	25
2.2.1 信号的时域分析方法	25
2.2.2 信号的频域分析方法	30
2.2.3 信号的时频分析方法	35
2.3 齿轮故障信号的特征选择	41
2.3.1 特征选择概述	42
2.3.2 过滤式特征选择	44
2.3.3 封装式特征选择	45

2.3.4 嵌入式特征选择 .....	48
2.4 小结 .....	48
参考文献 .....	48
<b>第 3 章 基于广义同步挤压变换的齿轮故障识别 .....</b>	<b>53</b>
3.1 广义同步挤压变换原理 .....	53
3.1.1 同步挤压变换 .....	54
3.1.2 广义同步挤压变换 .....	55
3.2 广义同步挤压变换在齿轮故障中的应用 .....	56
3.2.1 基于广义同步挤压变换信号分析的齿轮箱故障诊断原理 .....	56
3.2.2 仿真案例一 .....	57
3.2.3 仿真案例二 .....	64
3.2.4 实验测试 .....	68
3.3 小结 .....	73
参考文献 .....	74
<b>第 4 章 基于深度学习的齿轮箱故障识别 .....</b>	<b>75</b>
4.1 深度学习概述 .....	75
4.1.1 浅层学习 .....	75
4.1.2 深度学习基本思想 .....	76
4.1.3 深度学习与神经网络 .....	77
4.1.4 深度学习训练机制 .....	77
4.1.5 深度学习的应用 .....	78
4.2 深度学习的经典模型 .....	79
4.2.1 自动编码器 .....	79
4.2.2 稀疏自动编码器 .....	82
4.2.3 受限玻尔兹曼机 .....	83
4.2.4 深度信念网络 .....	90
4.2.5 深度玻尔兹曼机 .....	91
4.2.6 卷积神经网络 .....	93
4.3 经典深度学习模型在齿轮箱故障识别中的应用 .....	99
4.3.1 振动信号特征提取 .....	100
4.3.2 实验平台 .....	102
4.3.3 卷积神经网络实验评估 .....	105
4.3.4 DBN、DBM、RBM 和 SAE 实验评估 .....	108
4.4 多模态深度支持向量机及其在齿轮箱故障诊断中的应用 .....	116
4.4.1 高斯-伯努利深度玻尔兹曼机 .....	117
4.4.2 基于多模态同源特征的高斯-伯努利深度玻尔兹曼机分类 .....	118
4.4.3 支持向量机多模态融合 .....	119
4.4.4 振动信号的多模态特征 .....	121
4.4.5 齿轮箱故障诊断中的应用 .....	123
4.4.6 实验评估 .....	124
4.5 小结 .....	127

参考文献 .....	128
<b>第 5 章 基于润滑油中磨损颗粒的齿轮箱故障诊断</b> .....	<b>132</b>
5.1 油液中磨损颗粒信号中振动引发的干扰 .....	132
5.2 颗粒信号中振动信号的分离和应用 .....	133
5.2.1 基于积分变换的油中颗粒信号增强 .....	134
5.2.2 基于小波变换的降噪和信号分离 .....	136
5.2.3 积分和小波联合变换过程 .....	137
5.2.4 振动信号灵敏度的比较实验 .....	138
5.2.5 振动监控测试 .....	145
5.3 基于积分增强经验模式分解和互相关重构的油中颗粒特征提取 .....	147
5.3.1 经验模态分解 .....	148
5.3.2 基于 EMD 和高通滤波器的趋势项去除 .....	149
5.3.3 基于最大相关系数的信号重构 .....	151
5.3.4 实验分析 .....	155
5.4 基于最优分解小波变换的 ODM 信号增强方法 .....	162
5.4.1 最优分解小波变换方法 .....	162
5.4.2 实验测试 .....	168
5.5 小结 .....	174
参考文献 .....	174

中,对齿轮健康状态进行有效控制,实现灾难性故障的有效预警,及时采取补救措施<sup>[7]</sup>。

对于大型齿轮箱来说,针对齿轮的故障开发智能诊断系统,其投资收益非常明显,初始投资与设备故障累积的损失相比,要小得多。除此之外,投入使用齿轮故障智能诊断系统,能够有效地提高生产效率,保证安全生产和产品质量,降低维修费用和生产成本,从而给企业带来良好的经济效益<sup>[8]</sup>。例如,新日铁八幡厂热轧车间采用诊断系统的第一年,带钢卷取机的事故大幅减少,从原来的29次/年减少到8次/年;采用诊断系统的2000个英国国营工厂,每年节省了3亿英镑维修费用,减少了0.5亿英镑设备诊断费用,每年净获利2.5亿英镑<sup>[9,10]</sup>。

### 1.1.1 齿轮故障主要类型

常见的齿轮故障类型主要有齿轮偏心、齿面磨损、齿轮点蚀、齿轮断齿、齿轮裂纹、齿面胶合和齿面剥落故障,具体介绍如下。

#### 1. 齿轮偏心

由于加工装配不正确,会导致齿轮的中心与旋转轴的中心不重合,进而产生故障,这种故障称为齿轮偏心。当啮合的齿轮存在偏心时,相应的振动信号的转频成分会有一定增加,并出现调幅和调频现象,其特征为:以齿轮转频为调制频率,以啮合频率为载波频率<sup>[11-13]</sup>。

#### 2. 齿面磨损

在齿轮的转动过程中,由于环境中的杂质,如尘埃、沙砾、金属屑末,或者缺乏润滑油,导致润滑不良和齿面粗糙,从而引起齿面磨损。严重的磨损会使齿面齿形失真,齿侧间隙加大,即齿的几何形状和厚度均产生变化,引起动载负荷的加大,从而产生很大的噪声和冲击力,造成传动不平衡,甚至有可能导致齿轮断齿。这种故障多发生在开式齿轮转动场合。屈梁生等<sup>[11]</sup>的研究成果表明,存在齿面磨损的齿轮,在运转时其啮合频率会增加,相应地其谐波分量也会增加,尤其是高次谐波分量增加的分量更大;同时还会引起齿轮振动信号的时域波形偏离正弦波,扭曲失真,并且磨损越严重、越均匀,时域波形与方波越相似;如果齿轮磨损均匀,其振动信号中冲击现象并不明显,也不会出现明显的调制现象<sup>[12,14]</sup>。

#### 3. 齿轮点蚀

在循环、交变的压力作用下,达到一定重复次数的反复摩擦后,会在齿轮的表层或浅表层产生细小的、不规则的疲劳裂纹。一旦这些疲劳裂纹进一步扩展,金属微屑极可能脱落,形成麻点或凹点,这就是齿轮点蚀<sup>[14]</sup>。齿轮点蚀故障多发



生在闭式齿轮中,发生的位置多在靠近节线的齿根面上,会造成齿轮传动的不平衡,产生噪声。齿轮点蚀故障在振动信号中的表现为啮合频率被转频调制<sup>[13]</sup>。

#### 4. 齿轮断齿

齿的根部在传递周期性载荷过程中承受较高的弯曲应力,并且弯矩最大,因此在根部有较大的应力集中<sup>[1]</sup>。长期运行在周期性载荷的反复作用下,会导致疲劳裂纹并不断扩展,最终导致齿轮断裂。齿轮断齿是比较严重的齿轮故障,发生的部位在齿轮的根部,多发生在传动过程中的开式和硬齿面闭式疲劳过载齿轮上。断齿故障通常会激起齿轮箱体和齿轮本身按照其固有频率进行振动。以齿轮转动频率为特征的冲击现象会很明显地表现在振动信号的时域波形中。

#### 5. 齿轮裂纹

导致齿轮裂纹的主要原因有不当的磨削加工条件、淬火应力、材料弯曲疲劳、过大的载荷等。齿轮裂纹故障是一种范围很广的缺陷或损伤。如果啮合齿轮在运行中出现裂纹故障,其相应的振动信号的相位和幅值均会发生变化,出现相位调制和幅值调制。

#### 6. 齿面胶合

齿轮长时间连续运转,尤其是在高速运行和重负载低速工况下,会产生高温。润滑油的油膜会因为高温而被破坏,齿面的接触部分会产生瞬时高温,在高压力情况下,齿面的接触部分的金属局部可能黏合在一起。齿轮运行时的相对滑动将导致齿面撕成裂纹,该现象称为齿面胶合。齿面胶合多发生在靠近节线的齿面上,会对齿廓造成严重的破坏。

#### 7. 齿面剥落故障

相对滑动和相对滚动的切应力,反复作用在齿轮上,会导致齿轮表面金属剥落,通常有三种剥落形式:麻点剥落、浅层剥落和硬化层剥落<sup>[2,13]</sup>。在齿轮工作表面,因接触应力作用形成的片状和痘斑状的疲劳剥落,称为麻点剥落。浅层剥落仍在硬化层以内,只是比麻点剥落更深,形状呈鳞片状。硬化层剥落是比较严重的剥落,深度达到硬化层过渡区,呈大块状剥落。存在剥落故障的齿轮运行时,其振动信号的时域波形中会出现冲击脉冲现象,其周期为齿轮旋转频率,严重的剥落故障能够激发齿轮的固有频率振动<sup>[14]</sup>。

### 1.1.2 齿轮故障诊断的发展过程

在应对机械设备中上述齿轮故障的过程中,其诊断与维修技术经历了事后维

修、定期检查维护、基于设备运行状态数据维护和可预知的智能维护的发展过程。目前,可预知的智能维护已成为机械设备维护迅速发展的重要手段。

### 1. 事后维修

早期工业生产处于小规模阶段,设备涉及的技术并不复杂,人们不太关注设备的维修问题和设备利用率,整个社会对设备的故障认识也不足。该阶段对设备的维护方式是坏了再修、不坏不修,也就是事后维修。旋转机械通常具有大型、高速、连续工作的特点,齿轮传动往往处于关键环节。一旦齿轮出现故障,通常会造成整个设备停车,进而使整个生产流程停顿。事后维修往往会造成机械设备的严重损坏,同时存在不安全、检修时间长、维修费用高的缺点。

### 2. 定期检查维护

随着工业化的深度发展,生产方式发生了很大变化。20世纪初,汽车制造商福特开启了流水线生产方式,装配线成了该生产方式的典型代表。随之而来的是生产机器的技术变得越来越复杂,设备故障对工厂生产的影响变得越来越明显,定期检查维护应运而生,即在生产设备出现故障之前,就定期检查设备,并更换零部件。与事后维修相比,定期检查维护的进步是明显的。多年来,该方式在设备管理上发挥着积极重要的作用<sup>[6, 15]</sup>。但是,由于对设备故障发展规律缺乏足够的认识,也缺乏故障检测的科学手段,检查维护周期总体上还是凭人的经验,以及一些统计资料来制定,难以预防随机因素引起的设备故障,还容易造成过多的维修<sup>[6, 10, 16]</sup>。

### 3. 基于设备运行状态数据维护

随着信息技术的跳跃性发展,及其在工业生产中的广泛应用,机械设备的规模越来越大、功能越来越多、性能越来越高、结构越来越复杂<sup>[6]</sup>。无论是工业与制造过程、军用商用大型舰船,还是飞机与航天运载器、铁路与汽车运输领域,均广泛使用昂贵的、复杂的机械设备。由于机械设备系统之间的联系越来越紧密,一旦设备中某一零部件失效或发生故障,整个复杂系统的正常运转都会受到影响,严重时除了会造成巨大的经济损失,还可能导致环境污染、人员伤亡及产生恶劣的社会影响<sup>[7]</sup>。日益高效、大型、复杂的现代化机械设备故障诊断具有点检工作量大、检查维修质量要求高的特点,单纯靠人的感官和经验,已经难以应对。因此关键在于早期发现、防患于未然,这就要求使用先进仪器和科学方法对设备进行监测和诊断,出现了基于设备运行状态数据进行设备维护的方式。

### 4. 可预知的智能维护

今天大数据技术的广泛应用和人工智能的发展,给设备维护技术带来了两个

关键性的转变：一是传统的基于单个传感器的诊断，转变成基于智能系统的预测；二是基于事件驱动的维修、时间驱动的维修（即定期维修）转变为基于状态数据的可预知的智能维护。人工智能技术正深度融合到设备的管理与维护中。

由此，齿轮故障智能诊断技术应运而生，它旨在综合利用人工智能、计算机科学、信号处理、模式识别、力学等学科知识，同时利用先进的传感器和检测技术，实时获取齿轮的状态信息，了解和掌握齿轮在运行过程中的状态，确定其是否处于正常运行状态<sup>[17, 18]</sup>。一旦发现故障后，齿轮故障智能诊断技术能够根据建立的数学或物理模型，预测齿轮的剩余寿命。在齿轮完全失效之前，可以提前对其进行维修，达到早期发现故障及其原因并能预报故障发展趋势的目的，保证可靠、高效地发挥设备的应有功能，实现预知维修。文献[9]、[19]~[22]对故障智能诊断技术的目的给出了如下描述：

- 1) 及时发现并给出故障详情，准确确定故障类型、发生的部位及故障严重程度。
- 2) 针对不同类型、不同部位和不同严重程度的故障，制定相应的健康管理决策方案。
- 3) 可以预测设备的剩余寿命、运行状态和故障发生趋势。
- 4) 进行维修决策，以减少维修费用和提高设备利用率为宗旨。
- 5) 具备自动削弱、切换、补偿、消除和修复故障的能力，当设备出现故障时，能够保证设备继续完成其规定功能，并且尽量接近正常工作时的性能。
- 6) 具备一定的经济效益和社会效益。
- 7) 具备一定的生产管理和维修管理效益。采用故障智能诊断技术，能积累大量的设备状态信息，在大数据时代，这些数据为齿轮系统的维修决策和生产运行可提供强有力的支持。

## 1.2 齿轮故障智能诊断的研究内容

齿轮故障智能诊断是识别齿轮运行状态的一门综合性应用技术，涉及人工智能、计算机科学、信号处理、模式识别、力学等学科知识<sup>[22]</sup>。齿轮故障智能诊断的主要方法有基于状态信号的分析方法和润滑油液分析法<sup>[23]</sup>，前者通过采集齿轮运行中的状态信号，如振动信号、声音信号、温度信号等，运用信号分析方法和模式识别技术进行诊断；后者是根据摩擦磨损原理，通过润滑油液分析来实现。由于采集信号的传感器难以直接安装在齿轮箱内部，所以采集到的状态信号需经多个环节传递，常规的传递路线是：齿轮→轴→轴承→轴承座→测点，高频信号（20 kHz 以上）在传递过程中几乎丧失<sup>[11, 19]</sup>。要提高信噪比和有效地提取故障特征，通常还需借助较为细致的信号分析技术。

齿轮故障智能诊断技术的研究内容可分为故障机制研究和故障诊断方法研究

两大类, 共计 5 个环节: ①齿轮故障的机制研究; ②反映齿轮状态特征的信号选择和检测机制研究; ③采用适当的信号分析与处理方法对测量的信号进行研究; ④反映各类故障的信号特征选择研究; ⑤根据特征向量, 运用智能诊断方法进行决策研究, 并以此判断齿轮的工作状况。

### 1.2.1 齿轮故障机制研究

齿轮故障机制研究旨在解析故障形成和发展过程, 探索齿轮故障的特征及内在本质, 建立合适的数学模型, 求解模型, 获得近似解或解析解, 并从中总结出有利用价值的规律<sup>[24-29]</sup>。

齿轮啮合运动是一个复杂的非线性系统。针对不同工况下的齿轮传动, 国内外许多学者进行了很多的研究<sup>[30-32]</sup>。适当简化齿轮啮合传动副, 将齿轮啮合传动副简化为一个振动系统, 并假设齿轮表面粗糙度低且润滑良好。

齿轮啮合运动的机制研究主要包括研究齿轮在工作中的运动和动力传递特性; 研究齿轮损伤在振动时域、频域和时频敏感特征; 研究基于非线性微分方程建立适合齿轮监测和故障诊断的异常状态振动机制模型。

### 1.2.2 信号选择和检测机制研究

数据采集是开展齿轮啮合运动故障诊断的前提。齿轮运行过程中的振动信号、声学信号、温度信号、润滑油中颗粒信号等蕴藏着丰富的齿轮状态信息。信号检测过程中需要注意如下环节<sup>[10]</sup>:

1) 确定测试部位和测试点。齿轮是旋转机械设备的核心部件, 直接对齿轮的振动进行监测, 测试难度较高, 因此轴承座或机壳常被作为监测对象, 以获取齿轮传动的振动信号。故障不一样, 在不同方向上表现也不一样, 例如, 不平衡故障在水平方向上反应比较强烈, 松动故障在垂直方向上反应比较强烈, 不对中故障在轴向方向上反应比较强烈, 因此齿轮箱的振动信号测试通常考虑测量水平、垂直和轴向三个方向。

2) 选择与安装传感器。传感器的选择与安装直接影响采集信号的有效性和故障诊断的可靠性<sup>[33]</sup>。基于测量对象与测量环境, 选择传感器时首先要考虑如下因素: 传感器量程的大小、被测位置对传感器体积的要求、接触式还是非接触式测量、有线或无线通信等<sup>[13]</sup>, 然后确定传感器类型, 考虑灵敏度、频率响应特性、线性范围和精度等具体性能指标。

3) 设定数据采集参数。状态信号采集系统主要有如下性能指标: 最大采样频率、通道数、精度、采样长度、分辨率、输入偏移、非线性度、增益误差、输入

范围等。其中采样频率与采样长度是两个最重要的参数。一些数据采集系统还提供了滤波截止频率、采样触发模式等可选参数。

### 1.2.3 齿轮信号分析与处理方法研究

通过传感器采集的原始信号,包含着齿轮状态的重要信息。这些原始信号成分复杂,直接从它的外部现象观察隐含的内部规律,是一件很困难的事情。要提取齿轮的故障特征,找出内在规律,为齿轮故障诊断提供依据,必须采用现代信号处理方法对其时域、频域及时频特征进行分析处理。常用的状态信号特征量主要有:频域特征、时域特征、能量特征、时序特征、熵特征、分形特征。因此,信号分析与处理方法是齿轮故障智能诊断的关键研究内容之一。

### 1.2.4 齿轮信号特征选择研究

对于一个基于机器学习的齿轮故障诊断系统来说,信号特征选择仍然是一个重要的研究方向。由于信号分析与处理方法本质上的缺陷,单独采用时域、频域或时频特征,提取的故障特征可能有缺陷,从而影响了齿轮故障诊断。如果时域特征、频域特征及时频特征都被采用,不可避免地会包含一些和故障特征相关度不高的特征,导致信息冗余,产生高维输入的问题,增加了分类器的计算量。在大多数情况下,特征选择可以起到降维作用。如何从原始信号的时域特征、频域特征、时频特征、能量特征、分形特征等众多特征参数中,选择最优的特征参数集合作为决策算法的输入,是齿轮故障智能诊断的一个关键研究内容。

### 1.2.5 齿轮故障诊断的智能决策方法研究

齿轮故障智能诊断技术前4个环节,主要集中在信号的检测、采集及预处理。齿轮故障智能诊断技术最后一个环节是运用智能诊断方法进行决策,判断齿轮的状态,对故障特征进行识别分类,并预测未来的状态,包括剩余使用寿命的预测。状态模式识别及分类是决策的核心,其本质是齿轮故障状态特征的模式识别。迅速发展的人工智能技术有力地推动了齿轮故障状态特征的识别技术的发展。模糊分类技术、神经网络技术、专家系统、支持向量机(support vector machine, SVM)等智能信息处理方法先后被成功引入设备状态的故障识别中。在1.3节中,将对齿轮故障诊断方法进行综述。

## 1.3 齿轮故障诊断方法

常用的齿轮故障诊断方法有如下四类<sup>[34-36]</sup>：基于解析模型的齿轮故障诊断方法、基于信号分析与处理的齿轮故障诊断方法、基于知识的齿轮故障诊断方法和基于感知行为的齿轮故障诊断方法。

### 1.3.1 基于解析模型的齿轮故障诊断方法

基于解析模型的齿轮故障诊断方法是研究得最系统、最早的齿轮故障诊断方法。基本思想如下<sup>[37]</sup>：通常用一阶逻辑语句，基于组成系统的各个元部件之间的连接，建立一个待诊断的系统模型。基于解析模型的齿轮故障诊断常用方法有参数估计法<sup>[38, 39]</sup>和状态估计法<sup>[40]</sup>。

参数估计法的基本原理如下：根据采集到的观测数据，首先用故障特征量表示一种故障模式；然后建立故障特征量与模型参数间的可逆函数关系，利用该可逆函数关系来估计齿轮的故障类型。该方法既可以采用参数估计建立齿轮系统的动态参数模型，判断故障的方式是比较模型参数与系统参数；也可以依据特征构造判别函数和辨识所得模型参数，分类识别系统的工作状态<sup>[41]</sup>。

状态估计法的基本原理如下：首先运用系统的输入与输出，估计系统的内部状态，针对确定性系统，使用状态观测器估计，而针对随机系统，则采用状态滤波器估计；然后根据观测器或滤波器输出和系统输出之间的残差来诊断故障。状态估计法的优点是诊断速度较快、在线的计算量小，缺点是需要有较多的系统先验知识<sup>[42]</sup>。

基于解析模型的齿轮故障诊断方法的核心在于通过考虑尽可能多的变量和系统参数建立一个足够详尽的、精确的数学模型，分析输入该模型参数变化，实现故障的检测与诊断。建立的模型要充分考虑物理过程和对象，为其建立一个逼真的函数表示，包含系统的动态特性、可能故障和所有可能的未知输入。参数估计法和状态估计法都需要精确的数学模型来描述真实的物理过程，模型不能过于复杂，否则诊断需要大量的运算，非常耗时。齿轮故障诊断常在噪声和干扰环境下运行，不够稳定，难以获得系统模型。并且由于建模误差、扰动及噪声的存在，复杂系统的解析模型很难建立，所以该方法应用于非线性程度较高的旋转机械故障诊断时，有很大的局限性<sup>[24]</sup>。

### 1.3.2 基于信号分析与处理的齿轮故障诊断方法

基于信号分析与处理的齿轮故障诊断方法是根据传感器采集到的齿轮状态信

号,利用信号分析与处理方法提取有用的信息,然后提取能够有效反映齿轮故障的特征,利用故障特征识别来诊断故障的类型和部位<sup>[43]</sup>。此类方法直接利用了信号模型,不需要准确的对象模型,避免了建立对象数学模型的困难,尤其适用于非线性系统,是齿轮故障诊断的热点技术之一<sup>[44]</sup>。选择能真正反映齿轮运行状态的信号载体是基于信号分析与处理的齿轮故障诊断技术的关键。然后针对采集到的信号,利用时域分析技术(如相关函数分析、时间序列分析)、频域分析技术(如频谱分析、倒频谱分析)、时频分析技术(如小波分析)等信号处理方法,进行故障诊断<sup>[37]</sup>。常用的信号分析与处理方法主要包括以下几类。

### 1. 时域分析

时域特征是旋转机械最基本的特征参数,时域分析方法是一种传统的分析方法。尽管单一的时域分析在故障诊断中并不常用,但在齿轮故障的简易诊断中,直接利用测量信号波形的时域分析方法仍然是有效的手段之一。齿轮的不对中、齿轮偏心、齿轮齿数、松动、波形不稳定等状态信息都可从时域分析中收集<sup>[39,45]</sup>。除此之外,信号时域图中,也能反映振幅调制、冲击力、低速拍频、磨损、频率调制、齿轮缺口和破碎、低速轴承缺陷等故障特征<sup>[39]</sup>。

常用的时域特征指标有两类:无量纲和有量纲。最大值、均值、最小值、均方值、方差、均方根值、峭度、偏度、标准差等属于有量纲指标;波形指标、脉冲指标、峰值指标和裕度指标属于无量纲指标<sup>[39]</sup>。

广泛应用在齿轮故障诊断的时域分析方法是相关函数分析方法,包括自相关分析和互相关分析。正常状态下齿轮噪声是无序的随机信号,具有较宽且均匀的频谱;当齿轮工作状态不正常时,噪声将出现有规则的、周期性的脉冲。在基于噪声信号诊断齿轮故障时,采用自相关分析方法对齿轮的噪声信号进行分析,可以在故障发生的初期,查出齿轮的缺陷<sup>[24]</sup>。

在进行时域分析时,根据传感器检测得到的时间序列信号数据,通过曲线拟合和参数估计来建立数学模型。基于建立的数学模型来分析数据的变化规律,研究产生这些数据的齿轮健康状态和特性,最终以模型参数作为特征矢量来判别故障类型。这种方法被称为时间序列分析方法,属于一种处理动态数据的统计方法。数理统计学方法和随机过程理论是时间序列分析方法的基础,利用随机数据序列所遵循的统计规律来解决齿轮故障诊断问题<sup>[24]</sup>。

### 2. 频域分析

齿轮运转中的状态信号如振动信号、声音信号,属于典型周期信号。当齿轮的某元件存在故障时,一般会在频谱图上有一定的体现<sup>[39]</sup>。正常运转的齿轮箱,振动信号属于平稳信号,频谱图上体现的是啮合频率和轴的转频。一旦齿轮箱存

在故障时,常常产生冲击现象,啮合频率和轴的转频的频率成分和幅值都将发生变化。在频谱图中,既包含有啮合频率和它的各次谐波,还会出现程度不同的调制现象<sup>[46]</sup>。主要表现为:载波为箱体固有频率的共振调制、载波为齿轮固有频率的共振调制和载波为齿轮啮合频率及其谐波的调制。很多有用的齿轮故障状态信息包含在这些调制边频带的特点中<sup>[47]</sup>。

一个随机信号通过傅里叶变换解释成相互正交且频率不同的正弦波,促使能够对信号进行频域分析。基于傅里叶变换的频域分析方法有倒频谱、包络谱、功率谱、细化谱及快速傅里叶变换等,这些频谱分析方法被广泛应用在基于振动信号分析的齿轮故障诊断中。快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)是最普遍的频域分析方法之一,它在齿轮故障诊断中应用十分广泛。文献[48]、[49]中提出的齿轮箱故障诊断方法,采用频域统计特征量作为特征向量,取得了较好的齿轮故障诊断准确率,证实了齿轮箱的故障状态可以用频域统计特征量来表征。

### 3. 时频分析

建立在信号的平稳性假设上的傅里叶变换的频谱特征提取,存在明显的缺点<sup>[50]</sup>:首先,只适用于严格周期性或平稳的状态信号分析,否则分析结果没有物理意义;其次,只分析了频域信息,没有考虑时域特征。工程应用中,运行中的齿轮状态信号多是非线性、非平稳的,这些非线性、非平稳信号中包含着丰富的齿轮故障信息。对于非平稳信号来说,本质上有缺陷的傅里叶变换,无法得到频域和时域中的全貌和局部化的结果,因此提取的故障特征是存在缺陷的,这不可避免地影响了齿轮故障的准确诊断<sup>[51]</sup>。单独的频域描述或时域描述,都不能提供足够的信息来描述复杂的、非平稳的、非线性的齿轮运行信号。采用时频分析方法,可以对齿轮运行信号进行更好的分析和提取故障特征。时频描述已经有着广泛的成功应用,如演讲语音信号、生物医学信号、机械振动信号、地震信号及雷达信号分析。

Wigner-Ville 分布(WVD)<sup>[52]</sup>、短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)<sup>[53]</sup>和小波变换(wavelet transform, WT)<sup>[54]</sup>都是流行的时频分析方法。然而,这几种方法都有其固有的局限性。其中,基于WVD的变换是双线性的,当所分析的信号具有多分量性质时,WVD分析过程会受到严重干扰,由于在多个信号组件间引入了交叉项,很难有效提取瞬时频率。而短时傅里叶变换因其所用的时频窗固定不变,以至于时频分辨率很差,通常只适用于慢变信号分析。文献[55]~[57]提出一些方法以提高时频分辨率。然而,时频分辨率仍然受到海森伯提出的不确定原理限制:时域分辨率增加会导致频域分辨率下降,反之亦然。小波变换具有很好的时域局部化能力,能够有效提取瞬时频率,然而,产生的时频描述比较模糊,降低了瞬时幅值(instantaneous amplitude)的可读性<sup>[58]</sup>。



基于小波变换的频谱分析方法, Daubechies<sup>[59]</sup>等提出了同步挤压变换 (synchrosqueezing transform) 方法, 该方法已经成功应用于心电图和气候学信号分析<sup>[60, 61]</sup>。同步挤压变换方法沿着频率轴对信号  $s(t)$  的时频描述  $R(t, f)$  按一定比例进行挤压。同其他方法如时频重排 (reassignment) 等相比<sup>[62]</sup>, 同步挤压变换方法提供了更好的自适应能力和非常好的信号组成分量重构模式。然而, 正如 Daubechies 和 Maes<sup>[63]</sup>所指出的, 这种变换仅局限于时频表示结果的频率轴。对一个理想的信号来说, 频率轴的模糊化占据着垄断地位, 但是当处理带有噪声的调幅调频信号时, 时频表示结果还沿着时间轴进行扩散, 而时间轴的模糊化是不能被忽视的。通过同步挤压变换, 虽然调幅调频信号的瞬时频率轨迹能够被提取, 然而因为时间轴的扩散, 相关的瞬时幅度仍然不够清晰。除此之外, 作为一个时频增强表示后处理方法, 同步挤压变换方法的时频分辨率仍然受不确定原理限制。

同步挤压变换本质上是针对信号沿着频率轴进行增强表示, 旨在改进时频表示的效果, 无法处理在时间轴的模糊化。基于此, 本书提出一种既能处理在频率轴上能量扩散、又能处理在时间轴上能量扩散的算法, 并将其命名为广义同步挤压变换 (generalized synchrosqueezing transform, GST)<sup>[58]</sup>。对于一个有着恒定频率的信号, 研究显示, 小波时频表示的能量扩散仅沿着频率轴发生。基于这个观察, 为了利用同步挤压变换的特点, 对有着时变频率的初始信号, 通过组合平移、旋转、扭转等算子, 对时频信号进行了挤压增强表示。通过这些组合算子, 将时变频率信号映射到另一个相应地有着恒定频率的分析信号。Li 等已经将广义同步挤压变换应用于齿轮箱振动信号等信号的时频表示<sup>[58, 64]</sup>。仿真实验表明, 与已有的同步挤压方法及其他时频增强表示算法相比, 广义同步挤压变换在信号分析时有明显优势: 在不增加额外计算消耗下, 能够生成更加清晰的时频表示; 同时在一定程度上克服了不确定原理带来的时频分辨率受限的问题。

综上所述, 信号分析与处理既可以单独构成齿轮故障诊断方法, 也可以作为齿轮故障特征提取的工具, 还可以作为基于知识的故障诊断方法的基础。

### 1.3.3 基于知识的齿轮故障诊断方法

实际工业过程中, 齿轮传动系统常常具有滞后、强耦合、参数时变、非线性等特征。其数学模型要么不存在, 要么太复杂, 噪声统计特性不理想, 加上过程不确定和外部干扰等因素, 使得齿轮诊断问题十分复杂。基于知识的齿轮故障诊断方法<sup>[65]</sup>根据大量的齿轮运行状态信息和长期的实践经验, 以知识处理技术为基础, 集成数理逻辑与辩证逻辑、推理过程与算法过程相结合、符号处理与数值处理相结合, 在处理方法和概念上的知识化, 形成辩证统一的知识系统, 实现齿轮故障诊断智能化, 由于不需要精确的数学模型, 其应用比较广泛<sup>[66, 67]</sup>。