

# 滚动轴承故障诊断与寿命预测

王奉涛 苏文胜 著



科学出版社

# 滚动轴承故障诊断与寿命预测

王奉涛 苏文胜 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书面向现代机械设备故障诊断与维护技术领域发展需求,能满足重大机械装备早期故障诊断与剩余寿命预测技术理论的研究与工程分析需求。本书首先介绍了滚动轴承的结构特点和常见失效形式,然后从降噪处理、特征提取、故障诊断和寿命预测四个方面论述了滚动轴承故障诊断与寿命预测技术的原理和方法,并结合仿真信号和工程实例验证了上述方法的有效性。

本书可供从事机械设备状态监测与故障诊断、设备管理与维护的广大科技人员使用和参考,也适合作为高等院校机械、能源、动力等专业的高年级本科生、研究生的教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

滚动轴承故障诊断与寿命预测 / 王奉涛, 苏文胜著. — 北京: 科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058226-3

I. ①滚… II. ①王… ②苏… III. ①滚动轴承-故障诊断 ②滚动轴承-产品寿命-预测 IV. ①TH133.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 153607 号

责任编辑: 任 俊 / 责任校对: 郭瑞芝  
责任印制: 吴兆东 / 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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张: 13

字数: 316 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

京 北

## 序

滚动轴承是应用广泛的重要机械基础零部件，在装备制造业中不可或缺，它直接决定着重大装备和主机产品的性能、质量和可靠性。因此，研究滚动轴承故障诊断与寿命预测技术具有重要的意义。专著《滚动轴承故障诊断与寿命预测》正是为了满足这一需求而撰写的。本书基于滚动轴承振动信号，从降噪处理、特征提取、故障诊断和寿命预测四个方面总结了作者近年来的多项研究成果及工程应用案例，具有创新性、实用性和可读性。

机械设备诊断是一门涉及机械、电子、计算机、信号处理与人工智能等多种领域的交叉学科，当前，关于这方面的论著颇丰。但多数专著是围绕旋转机械整机故障来论述的，专门论述滚动轴承故障诊断与寿命预测技术的专著，尚为数不多。

本书具有以下特点：（1）针对振动信号在复杂路径下微弱故障特征提取的难题，运用先进的信号处理技术，从降噪和解调两方面给出了解决方法；（2）针对滚动轴承可靠性评估与寿命预测的难题，从滚动轴承性能退化趋势预测入手，运用统计学建模方法和人工智能技术给出了解决方案；（3）针对深度学习方法的快速发展，利用其强大的建模和表征能力，开展了基于堆叠自动编码器的滚动轴承智能诊断方法以及基于长短期记忆网络的滚动轴承寿命预测方法研究。

王奉涛博士是一位从事机械设备故障诊断工作超过 15 年的年轻教师。在现代机械重大装备动态监测与故障诊断方面，他和他的团队做了切切实实的探索和实践工作。我和王奉涛老师有过两次项目上的合作，特别是在国家科技支撑计划“中国高速列车关键技术研究及装备研制”的合作过程中，我对他们的工作有了比较深入的了解。他们承担并完成了多项国家自然科学基金，在此基础上面向石化、航空、汽车制造、高铁、军工等工矿企业的工程需求，开发了数十套机械设备状态监测与故障诊断系统，成果获得了国家科技奖励。

希望有更多的青年学者投身于以轴承、齿轮为代表的机械基础零部件的研究中，提高我国机械基础零部件的设计、制造和运维管理水平，进而提升我国装备制造业的发展水平。祝王奉涛老师以及所有为此努力的朋友们，取得更大的成就。我会一直与你们同行。

中国科学院院士、大连理工大学教授 王立光

2018年9月于大连

# 前 言

近年来,随着社会进步和科技发展,机械设备愈加趋向高性能、高速度、大负荷和复杂化,飞行器、舰船、车辆、发电机组等机械装备在国民经济中起着举足轻重的作用。滚动轴承是装备制造中重要的、关键的基础零部件,广泛应用于国民经济和国防事业各个领域,决定着重大装备和主机产品的性能、质量和可靠性,被誉为“工业的关节”。但同时,滚动轴承也是旋转机械易损部件之一。据统计,旋转机械的故障有30%是由轴承故障引起的,且轴承一旦发生故障,将会引发一系列连锁故障。因此,滚动轴承的故障诊断技术一直是机械故障诊断中重点发展的方向之一。

在众多的故障诊断技术中,基于振动信号的故障诊断是一种非常有效的方法。现代信号处理技术的快速发展使得故障诊断的应用范围越来越广泛、诊断结果越来越准确,大大降低了事故发生率。在滚动轴承故障诊断技术中,研究振动信号处理理论和方法是故障特征提取和故障诊断分析的基础。然而,在滚动轴承运行过程中,采集信号时难免会受到大量非监测部位振动的干扰,造成有效信息的淹没,这种现象在滚动轴承早期故障阶段时表现得尤为明显。如何有效分离出轴承微弱故障特征,排除其他噪声信号的干扰,实现故障的早期监测和诊断,一直是人们急于解决而又未能很好解决的难题。作者针对滚动轴承故障信号存在周期性冲击、幅值调制的特点,运用小波分析、经验模式分解、流形分析等方法来进行降噪和解调,有效地识别出滚动轴承早期微弱故障特征,然后采用谱峭度、相空间ICA等方法进行故障诊断。

考虑到深度学习方法的快速发展,作者还尝试应用堆叠自行编码器 and 长短期记忆神经网络进行滚动轴承的故障诊断与寿命预测。作为模式识别和机器学习领域最新的研究成果,深度学习理论以强大的建模和表征能力在图像和语音处理等领域的大数据处理方面取得了丰硕的成果,也引起了机械故障诊断领域众多学者的注意。相对于传统的基于信号处理的故障诊断方法,深度学习方法具有以下优点:一是不需要使用大量的信号处理技术和丰富的工程实践经验来提取故障特征;二是使用深层模型可以表征大数据情况下信号与健康状况之间复杂的映射关系。

作者有幸承担和参加了国家自然科学基金资助项目“局域波法及其工程应用研究”(编号:50475155,2005—2007)、“基于改进Cox模型的航空发动机关键部件寿命预测理论与方法研究”(编号:51375067,2014—2017)、“基于深度学习的大型金属构件增材制造装备动态监测与智能诊断理论与方法研究”(编号:51875075,2019—2022)和教育部科学技术研究重点项目“兆瓦级风力发电机组齿轮箱早期故障诊断方法研究”(编号:109047,2009—2010)等,针对机械工程中的实际问题,做了一些探索。在研究和应用过程中,作者体会到准确提取复杂传递路径下振动信号微弱故障特征的难度和重要性,同时运用深度神经网络突破了传统浅层神经网络对复杂分类问题泛化能力较弱的瓶颈。近年来,本文研究成果已应用于石化、航空、汽车制造、高铁、军工等领域。本文研究成果于2017年获国家科技

进步二等奖。作者将所取得的成果进行加工、整理，写成本书出版，供从事机械设备故障诊断工作的科技人员和师生参考。

全书分为四部分共 15 章。第一部分为降噪方法，主要介绍 EMD 降噪方法、双树复小波域隐 Markov 树模型降噪方法和对偶树复小波流形域降噪方法；第二部分为特征提取，包括基于振动信号的特征提取、Morlet 小波和自相关增强特征提取、张量流形特征提取和小波包样本熵特征提取；第三部分为故障诊断，给出了谱峭度故障诊断方法、相空间 ICA 故障诊断方法和深度学习故障诊断方法；第四部分为寿命预测，论述了流形和模糊聚类轴承性能退化监测、基于威布尔比例故障率模型的寿命预测、基于改进 Logistic 回归模型的寿命预测和基于长短期记忆网络的寿命预测。

本书第 1、5、7、10~15 章由王奉涛著写，第 2~4、6、8、9 章由苏文胜著写，全书由王奉涛统稿。在书稿著写过程中，王雷博士、王洪涛硕士、陈建国博士、马琳杰硕士参与了本书有关内容的编写，在文稿、绘图及制表等方面做了大量的工作，在此表示感谢。

本书获得了国家自然科学基金委、江苏省特种设备安全监督检验研究院无锡分院的大力支持，在此表示由衷的感谢。感谢中国石化北京燕山分公司、中车威墅堰机车车辆工艺研究所有限公司、中国第一汽车集团有限公司、中国石油辽河油田公司、大连固特异轮胎有限公司等有关单位的支持和配合。衷心感谢中国科学院王立鼎院士对我们工作的一贯热情支持和帮助并为本书精心作序。谨向长期以来关心和支持我们工作的众多同仁致以衷心的感谢！

由于作者水平有限，本书难免存在一些欠妥和不当之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2018 年 8 月于大连

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 滚动轴承简介	1
1.1.1 滚动轴承的特点	1
1.1.2 滚动轴承的结构	1
1.2 滚动轴承故障诊断	2
1.2.1 常见失效形式	2
1.2.2 故障诊断方法	4
1.3 滚动轴承寿命预测	5
1.3.1 滚动轴承寿命预测	5
1.3.2 寿命预测方法	5
1.4 研究现状	7
1.4.1 故障诊断研究现状	7
1.4.2 寿命预测研究现状	9
参考文献	10

## 第一部分 降噪方法

第 2 章 EMD 降噪方法	13
2.1 EMD 的基本原理和性质	13
2.1.1 EMD 的基本原理	13
2.1.2 EMD 的完备性和正交性	15
2.2 基于阈值处理的 EMD 降噪	16
2.3 基于滤波处理的 EMD 降噪	17
2.4 两种 EMD 降噪方法的性能比较	19
2.5 应用实例	21
参考文献	23
第 3 章 双树复小波域隐 Markov 树模型降噪方法	25
3.1 小波变换的理论基础与性质	25
3.1.1 离散小波变换	25
3.1.2 复小波变换	26
3.1.3 双树复小波变换	27

3.1.4	DT-CWT 的滤波器设计	28
3.1.5	DT-CWT 的平移不变性分析实例	30
3.2	小波域隐 Markov 树模型	30
3.2.1	隐 Markov 模型	31
3.2.2	HMT 模型的原理	32
3.3	双树复小波域隐 Markov 树降噪模型	37
3.3.1	DTCWT_HMT1 法	37
3.3.2	DTCWT_HMT2 法	37
3.4	应用实例	37
3.4.1	仿真信号	37
3.4.2	实际信号	42
	参考文献	43
<b>第 4 章</b>	<b>对偶树复小波流形域降噪方法</b>	<b>45</b>
4.1	理论基础	45
4.2	对偶树复小波流形域降噪	46
4.2.1	对偶树复小波流形域降噪原理	46
4.2.2	DTCWT_MVU 降噪方法步骤	47
4.3	应用实例	48
4.3.1	DTCWT_MVU 方法仿真验证	48
4.3.2	DTCWT_MVU 方法性能讨论	50
4.3.3	DTCWT_MVU 方法的工程应用	55
	参考文献	56
<b>第二部分 特征提取</b>		
<b>第 5 章</b>	<b>基于振动信号的特征提取</b>	<b>59</b>
5.1	时域和频域特征参数提取	59
5.1.1	时域特征参数提取	59
5.1.2	频域特征参数提取	61
5.2	时频域特征参数提取	62
5.2.1	小波包理论	62
5.2.2	EMD 理论	63
5.3	样本熵的特征参数提取	64
	参考文献	65
<b>第 6 章</b>	<b>Morlet 小波和自相关增强特征提取</b>	<b>66</b>
6.1	Morlet 小波滤波器的优化问题	66
6.1.1	连续小波变换	66



6.1.2	Morlet 小波滤波器	67
6.1.3	最优参数选择策略	67
6.2	遗传算法	69
6.2.1	染色体表示	70
6.2.2	初始化种群	71
6.2.3	适应度函数	71
6.2.4	遗传操作	71
6.3	自相关增强算法	72
6.3.1	自相关运算	72
6.3.2	自相关包络功率谱	72
6.3.3	扩展 Shannon 熵函数	72
6.3.4	方法	73
6.4	应用实例	73
6.4.1	仿真结果	73
6.4.2	试验台数据结果	75
6.4.3	实际故障轴承结果	78
	参考文献	80
<b>第 7 章</b>	<b>张量流形特征提取</b>	<b>82</b>
7.1	理论基础	82
7.1.1	HHT 时频谱	82
7.1.2	张量流形理论	83
7.2	张量流形时频故障特征提取	85
7.2.1	方法的原理及步骤	85
7.2.2	时频特征参数的定义	86
7.3	应用实例	87
7.3.1	故障信号的 HHT 时频特征	87
7.3.2	张量流形时频特征参数提取	90
	参考文献	95
<b>第 8 章</b>	<b>小波包样本熵特征提取</b>	<b>97</b>
8.1	理论基础	97
8.1.1	熵概念的发展及泛化	97
8.1.2	样本熵	100
8.1.3	小波包分解	103
8.2	小波包样本熵的特征提取	104
8.2.1	小波包样本熵的特征提取方法	104
8.2.2	实际信号分析	104
	参考文献	106

## 第三部分 故障诊断

第 9 章 谱峭度故障诊断方法 .....	108
9.1 谱峭度的定义 .....	108
9.2 谱峭度故障诊断方法 .....	108
9.2.1 谱峭度检测轴承故障的物理解释 .....	108
9.2.2 峭度图 .....	109
9.2.3 EMD 降噪和谱峭度法的滚动轴承故障诊断步骤 .....	109
9.3 工程实例 .....	110
参考文献 .....	111
第 10 章 相空间 ICA 故障诊断方法 .....	112
10.1 基本理论 .....	112
10.2 相空间重构 ICA 方法 .....	112
10.2.1 相空间重构 ICA 的详细步骤 .....	112
10.2.2 相空间重构及参数选择 .....	113
10.3 应用实例 .....	116
10.3.1 传统信号处理方法提取早期故障的能力 .....	117
10.3.2 相空间 ICA 提取早期故障特征信息 .....	118
参考文献 .....	121
第 11 章 深度学习故障诊断方法 .....	123
11.1 理论基础 .....	123
11.1.1 卷积神经网络 .....	123
11.1.2 受限玻尔兹曼机 .....	124
11.1.3 自动编码器模型 .....	125
11.1.4 深度自动编码网络 .....	127
11.2 结合核函数与自动编码器的深度学习 .....	127
11.2.1 基于核函数的自动编码器 .....	127
11.2.2 核函数选择 .....	128
11.2.3 方法流程 .....	129
11.3 航空发动机中介轴承诊断实例 .....	130
11.3.1 试验台 .....	130
11.3.2 试验结果分析 .....	132
参考文献 .....	135

## 第四部分 寿命预测

第 12 章 流形和模糊聚类轴承性能退化监测 .....	137
12.1 理论基础 .....	138

12.1.1	模糊 C 均值聚类 .....	138
12.1.2	LLE 流形算法 .....	138
12.2	流形和模糊聚类轴承性能退化监测 .....	139
12.2.1	监测方法的流程及步骤 .....	139
12.2.2	监测方法的关键问题分析 .....	140
12.3	仿真验证 .....	143
12.3.1	滚动轴承性能特征提取 .....	143
12.3.2	流形特征的本征维数 .....	147
12.3.3	流形特征的性能讨论 .....	147
12.3.4	内环性能退化评估 .....	150
12.4	应用实例 .....	150
12.4.1	滚动轴承性能退化实验台介绍 .....	151
12.4.2	滚动轴承全寿命周期时域特征监测结果 .....	152
12.4.3	基于流形和模糊聚类的滚动轴承性能退化监测 .....	153
	参考文献 .....	155
<b>第 13 章</b>	<b>基于威布尔比例故障率模型的寿命预测 .....</b>	<b>156</b>
13.1	威布尔比例故障率模型 .....	156
13.1.1	威布尔比例故障率模型 .....	156
13.1.2	威布尔比例故障率模型的参数估计 .....	156
13.1.3	剩余寿命预测 .....	157
13.2	趋势预测理论 .....	158
13.2.1	灰色系统理论的原理及应用 .....	158
13.2.2	GM(1,1)预测模型的建模过程 .....	158
13.2.3	GM(1,1)模型适用要求 .....	160
13.3	可靠性评估 .....	161
13.4	寿命预测 .....	162
13.4.1	趋势预测方法研究 .....	162
13.4.2	趋势预测 .....	165
13.4.3	剩余寿命预测 .....	167
13.5	应用实例 .....	168
13.5.1	滚动轴承试验台介绍 .....	168
13.5.2	滚动轴承性能退化高维特征集构建 .....	168
13.5.3	滚动轴承核主元的性能退化评估 .....	170
13.5.4	剩余寿命预测 .....	172
	参考文献 .....	174
<b>第 14 章</b>	<b>基于改进 Logistic 回归模型的寿命预测 .....</b>	<b>175</b>
14.1	Logistic 回归模型 .....	175

14.1.1	二项分类 Logistic 回归模型	175
14.1.2	多项分类 Logistic 回归模型	176
14.1.3	回归参数的估计	176
14.1.4	改进 Logistic 回归模型	177
14.2	改进 Logistic 回归模型轴承寿命预测	177
14.2.1	特征量选取	178
14.2.2	主元分析(PCA)	179
14.2.3	基本算法流程	180
14.3	应用实例	181
14.3.1	试验设备	181
14.3.2	获取有效特征值和相对特征值	181
14.3.3	PCA 降维与退化趋势分析	183
14.3.4	可靠性评估与剩余寿命预测	184
	参考文献	186
<b>第 15 章</b>	<b>基于长短期记忆网络的寿命预测</b>	<b>187</b>
15.1	基础理论	187
15.1.1	循环神经网络 RNN	187
15.1.2	LSTM 神经网络预测模型	187
15.2	方法步骤	188
15.3	滚动轴承特征参数集的构建	189
15.3.1	滚动轴承试验台介绍	189
15.3.2	轴承特征参数评价指标	190
15.3.3	轴承特征参数提取	190
15.3.4	寿命预测结果分析	194
	参考文献	196

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 滚动轴承简介

### 1.1.1 滚动轴承的特点

滚动轴承是一种精密的标准机器部件，它在机械设备中应用非常广泛。滚动轴承具备一系列显著的优点，比如：摩擦系数小，运行精度高，对润滑剂黏度不敏感（可以直接使用润滑脂，不必像滑动轴承一样使用复杂的润滑供油系统），无论高速、低速均可以承受径向和轴向载荷，国际标准化程度高，可替代性好，易于大批制造，价格低廉。但是滚动轴承也是机器设备中最容易发生故障损坏的零件之一，这是因为滚动轴承承受冲击的能力较差，在突然的冲击荷载作用下易发生损坏。此外，安装不当、润滑不良、转速过高、腐蚀生锈等因素都是引起滚动轴承故障的重要因素。滚动轴承故障是机器设备失效的重要原因，据有关资料显示<sup>[1]</sup>，由滚动轴承损伤造成的故障占机械故障总数的 21%，因此滚动轴承的故障监测十分重要。对滚动轴承进行有效的故障诊断不但可以防止机械工作精度下降，减少或杜绝事故发生，而且可以最大限度地发挥轴承的工作潜能，确保大型机械设备系统的最大连续运行时间和使用效率，节约相关维修开支。

### 1.1.2 滚动轴承的结构

滚动轴承是机械设备中的重要零部件，如图 1-1 所示，其通常由四部分组成：内环、外环、滚动体、保持架。



图 1-1 滚动轴承基本结构

1-外环；2-滚动体；3-内环；4-保持架

(1) 内环。一般情况下，内环是固定在轴上随转轴一起转动的。内环外壁的沟槽是供滚动体转动的轨道，称为内滚道。

(2)外环。外环是固定在轴承座或者机器壳体上的，主要起支撑和保护滚动体的作用。外环内壁的沟槽称为外滚道。在某些情况下，滚动轴承内环是固定的，起支撑作用，而外环是旋转的。

(3)滚动体。滚动体在内滚道和外滚道形成的腔体中滚动，维持内环与外环之间的相对运动。轴承承载能力的大小由滚动体的数目、形状、大小所决定。

(4)保持架。保持架能使滚动体在滚道中均匀分布，始终保持等间距，避免滚动体之间发生碰撞，并能将相等的载荷轮流、平均地分配到每个滚动体上。

## 1.2 滚动轴承故障诊断

### 1.2.1 常见失效形式

滚动轴承在运转过程中可能会由于各种原因引起损坏，如装配不当、润滑不良、水分和异物侵入、腐蚀和过载等都可能造成轴承过早损伤。即使在安装、润滑和使用维护都正常的情况下，经过一段时间运转，轴承也会出现疲劳剥落和磨损而不能正常工作。滚动轴承的失效形式主要有以下七种<sup>[2]</sup>。

#### 1. 疲劳剥落

滚动轴承的内、外滚道和滚动体表面既承受载荷又相对滚动。由于交变载荷的作用，滚动轴承首先在表面下一定深度处(最大剪应力处)形成裂纹，继而扩展到接触表面使表层发生剥落坑，最后发展到大片剥落，这种现象就是疲劳剥落(图 1-2)。疲劳剥落使机械在

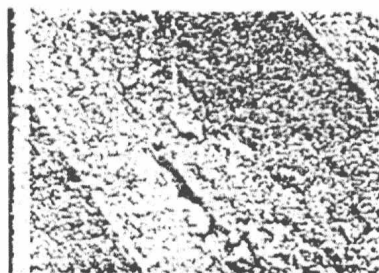


图 1-2 疲劳剥落

运转时产生冲击、振动和噪声。在正常工作条件下，疲劳剥落往往是滚动轴承失效的主要原因，一般所说的轴承寿命就是指轴承的疲劳寿命，轴承的寿命试验就是疲劳试验。试验规程规定，在滚道或滚动体上出现面积为  $0.5\text{mm}^2$  的疲劳剥落坑就认为轴承寿命终结。滚动轴承的疲劳寿命分散性很大，同一批轴承中，其最高寿命与最低寿命可以相差几十倍乃至几百倍，这从另一角度说明了滚动轴承故障监测的重要性。

#### 2. 磨损

滚道与滚动体的相对运动和尘埃异物的侵入引起轴承表面磨损(图 1-3)，润滑不良也会加剧磨损。磨损的结果使轴承游隙增大、表面粗糙度增加、轴承运转精度降低，因而降低了机器的运动精度，增大了振动和噪声。对于精密机械轴承，往往是磨损量限制了轴承的寿命。

#### 3. 塑性变形

当轴承受到过大的冲击载荷或静载荷，或因热变形引起额外的载荷，或有硬度很高的

异物侵入时都会在滚道表面上形成凹痕、划痕或压痕(图 1-4)。这导致轴承在运转时产生剧烈的振动和噪声。而且,压痕引起的冲击载荷会进一步引起附近表面的剥落。

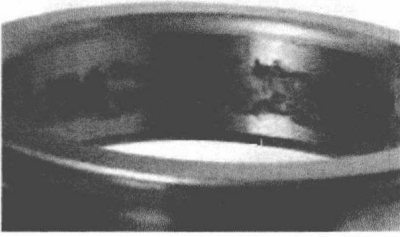


图 1-3 磨损

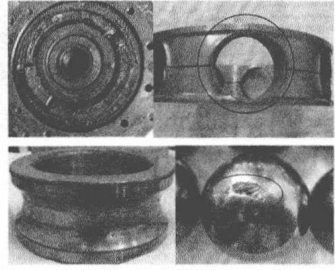


图 1-4 塑性变形

#### 4. 锈蚀与电蚀

锈蚀是滚动轴承失效严重的问题之一(图 1-5)。高精度轴承可能会由于表面锈蚀导致精度丧失而不能继续工作。水分或酸、碱性物质直接侵入会引起轴承锈蚀。当轴承停止工作后,轴承温度下降到露点,空气中的水分凝结成水滴附在轴承表面上,引起轴承锈蚀。此外,当轴承内部有电流通过时,电流有可能通过滚道和滚动体的接触点,使很薄的油膜引起电火花而产生电蚀,在轴承表面上形成搓板状的凹凸不平。

#### 5. 裂纹与断裂

轴承元件的裂纹和断裂是最危险的一种损坏形式,这主要是由于轴承超负荷运行、金属材料有缺陷和热处理不良所引起的。转速过高、润滑不良、轴承在轴上压配过盈量太大以及过大的热应力都会引起裂纹和断裂(图 1-6)。

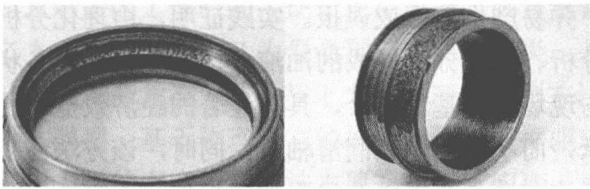


图 1-5 锈蚀与电蚀

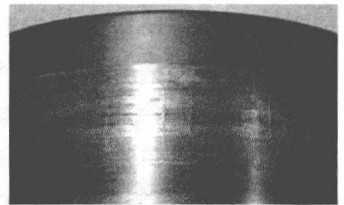


图 1-6 裂纹与断裂

#### 6. 胶合

轴承在润滑不良、高速重载情况下工作时,由于摩擦发热,轴承零件可在极短时间内达到很高的温度,导致表面烧伤及胶合(图 1-7)。

#### 7. 保持架损坏

轴承装配和使用不当可引起保持架发生变形(图 1-8),从而增加其与滚动体之间的摩擦,甚至使某些滚动体卡死不能滚动;也有可能造成保持架与内、外圈发生摩擦等。这些都将加大轴承的振动、噪声与发热,导致轴承损坏。

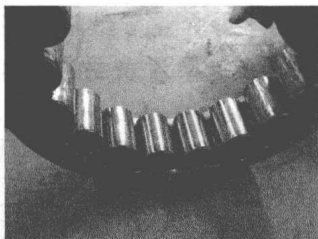


图 1-7 胶合

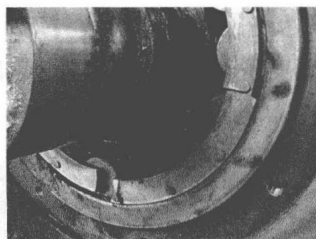


图 1-8 保持架损坏

## 1.2.2 故障诊断方法

在滚动轴承故障诊断之前，必须要选择用什么途径来获得有效的故障信息，即选择一种能反映故障信息的载体。目前常用的故障诊断方法可以归纳为以下几种<sup>[3]</sup>。

### 1. 温度监测法

通过监测轴承座(或箱体)处的温度来判断轴承工作是否正常。温度监测对轴承载荷、速度和润滑情况的变化反映比较敏感，尤其是对润滑不良而引起的轴承过热现象。然而，当轴承出现诸如早期点蚀、剥落、轻微磨损等比较微小的故障时，轴承温度几乎不受影响，只有当故障达到一定程度时，轴承才会出现明显的温升。因此，温度监测法不适用于点蚀、局部剥落等所谓的局部损伤类故障。

### 2. 油液监测法

油液检测法分为两种：一种是根据光谱、铁谱等实验室方法分析油样的成分、磨粒的形状、大小和色彩等来确定发生磨损的部位、原因和程度，从而判断轴承的好坏；另一种是根据油液的黏度变化监测轴承的好坏。油液分析应采用系统方法，因为单一手段往往由于其局限性而导致不全面的诊断结论，并易产生漏报或误报。实践证明，由理化分析、污染度测试、发射光谱分析、红外光谱分析、铁谱分析构成的油液分析系统，在设备状态监测中可以发挥重要作用，其诊断结论与现场实际基本吻合，具有显著的经济效益和社会效益。另外，该方法只适用于油润滑轴承，而不适用于脂润滑轴承。同时，该方法易受到其他非轴承损坏掉下的颗粒的影响，所以该方法具有很大的局限性。

### 3. 振动分析法

振动分析法是目前设计使用最多的、也是最有效的方法之一。通过安装在轴承座或箱体适当位置的振动传感器监测轴承振动信号，并对此信号进行分析与处理来判断轴承工况与故障。由于振动监测法具有：①适用于各种类型、各种工况的轴承；②可以有效地诊断出早期微小故障；③信号测试与处理简单、直观；④诊断结果可靠等优点，在实际中得到了极为广泛的应用。目前，国内外开发生产的各种系统和滚动轴承监测与诊断仪器中，大都是根据振动法的原理制成的，有关轴承监测与诊断方面的文献 80%以上讨论的是振动法。从使用、实用、有效的观点看，目前没有比振动法更好的滚动轴承监视与诊断方法。本文采用的方法就是振动分析法。



#### 4. 声发射法

声发射技术是近几年发展起来的新兴技术，在滚动轴承故障诊断中已经开始获得应用。声发射属超声波信号，是一种弹性波。当承受载荷的滚动轴承通过剥落处时，缺陷就扩展，同时产生声发射现象，并且具有周期性，根据周期可以判别故障类型和部位。由于滚动轴承的故障信息较微弱，而背景噪声强，因此，声发射法与振动信号分析法相比具有以下优点：

(1) 特征频率明显：分别用振动加速度计和声发射传感器在机器同一部位监测轴承故障；进行频谱分析时，振动信号频谱图比较复杂，不易识别故障，而声发射清晰明了，易于故障识别。

(2) 预报故障时间早：在机器的载荷和工作转速等完全相同的条件下，同时用声发射和振动信号监测轴承工作状态时，由于轴承微裂纹扩展要经过一个慢扩展阶段，该阶段还不足以引起轴承明显振动，所以声发射信号已经比较明显了。

但是，声发射技术需要昂贵的专用设备，所以生产中的应用受到一定影响。

除了上述故障诊断方法外，还有油膜电阻诊断法、光纤监测诊断法和间隙测定诊断法等。总体来说，经典的滚动轴承诊断方法已经比较成熟地应用在实际工程领域中，但都是在特征提取的基础上进行诊断，如果无法提取特征，这些诊断方法也就无从谈起。目前，滚动轴承故障诊断的热点仍是对采集的信号进行处理和信息融合方法的研究，目的是使监测与诊断能更方便、更准确。

### 1.3 滚动轴承寿命预测

#### 1.3.1 滚动轴承寿命预测

滚动轴承的剩余寿命预测作为故障诊断的一个关键步骤，对于设备安全运行至关重要。通过对轴承进行可靠的寿命预测，可以准确地掌握设备的运行状况、判断轴承的故障程度以及剩余的工作时间，便于使用者及时制定维修计划。在对滚动轴承剩余寿命的研究基础之上，Jardine 等<sup>[4]</sup>认为寿命预测主要有三类：基于概率统计的寿命预测方法、基于信息新技术的寿命预测方法、基于力学的寿命预测方法。Heng 等<sup>[5]</sup>认为旋转机械的寿命预测分为两大模型：基于物理状态的模型和基于数据驱动模型。

基于力学的寿命预测方法主要有：基于应变、应力、累积疲劳损伤、能量等剩余寿命预测方法。其中基于应力的寿命预测方法是最早提出并用于剩余寿命预测的，也是现在比较常用的剩余寿命预测方法，主要适用于应力水平较低、使用寿命长的工程构件。但是对于低速重载、寿命较短的情况，轴承比较适合基于应变的剩余寿命预测方法。1924年，累积损伤理论被提出并且越来越受到关注，现在已经在剩余寿命预测领域被广泛应用<sup>[6]</sup>。Fatemi 等提出了在疲劳应变能量下的剩余寿命预测，并取得较好的结果<sup>[7]</sup>。基于力学的剩余寿命预测方法在机械装备寿命预测领域内得到广泛的引用，并且现在不断被改进优化，但是该方法受外界干扰较大、通用性差。

#### 1.3.2 寿命预测方法

趋势预测指根据已有的历史时间序列数据建立预测模型，对未来的数据变化进行推测。目前常用的趋势预测方法如下。