



乏信息理论与滚动轴承性能评估系列图书

夏新涛 徐永智 著

滚动轴承性能变异的 近代统计学分析



科学出版社

乏信息理论与滚动轴承性能评估系列图书

滚动轴承性能变异的 近代统计学分析

夏新涛 徐永智 著

本书相关内容得到国家自然科学基金(51475144、51075123)资助

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书是研究滚动轴承性能变异的近代统计学分析问题的学术专著。在介绍有关理论基础知识后,提出了滚动轴承性能数据的稳健化判断方法、稳健化处理方法、参数与非参数融合分析方法、混沌动力学分析方法、振动性能变异评估以及性能参数的贝叶斯区间评估方法,从而构建出滚动轴承性能变异过程近代统计学融合评估的体系雏形,为深入揭示滚动轴承性能变异的新特性与新机制提供了一些新思路。

本书可供从事滚动轴承设计、制造、测试、应用的理论研究与生产实践的科技人员阅读,也可作为高等院校机械类师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

滚动轴承性能变异的近代统计学分析 / 夏新涛, 徐永智著. —北京: 科学出版社, 2016

(乏信息理论与滚动轴承性能评估系列图书)

ISBN 978-7-03-049767-3

I. ①滚… II. ①夏… ②徐… III. ①滚动轴承-性能-变异-统计分析
IV. ①TH133.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 209963 号

责任编辑: 裴 育 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

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

*

2016 年 8 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 391 000

定价: 95.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



夏新涛，男，1957年1月出生于河南省新乡县。1981年12月于原洛阳农机学院（即洛阳工学院，现为河南科技大学）本科毕业后留校；1985年9月至1987年1月于哈尔滨工程大学学习硕士研究生主要课程；2007年12月于上海大学博士毕业。现任河南科技大学教授，教学名师，博士生导师（河南科技大学和西北工业大学机械设计及理论学科），中国轴承工业科技专家，洛阳市优秀教师和劳动模范。兼任 *Measurement* 等多个国内外杂志的评论员以及《轴承》杂志编委等职。主要从事滚动轴承设计与制造理论、精密制造中的测量理论以及乏信息系统理论等教学与研究。主持和参与完成国家与省部级科研项目21项，获得省部级教育教学、自然科学与科学技术奖7项；著书15部，授权发明专利8项，发表学术论文200余篇。

E-mail: xiagt1957@163.com; xiagt@haust.edu.cn。



徐永智，男，1974年4月出生于河南省洛阳市孟津县。1997年7月于洛阳工学院（现为河南科技大学）专科毕业后在中国一拖集团从事技术开发工作；2008年7月于河南科技大学硕士毕业；2008年9月开始在三门峡职业技术学院机电系机电一体化专业从事教学工作；2012年3月至今在西北工业大学攻读博士学位。发表学术论文9篇。

E-mail: xxyyzzh@163.com。

前 言

基于近代统计学理论,本书研究滚动轴承性能变异问题。在介绍有关理论基础知识后,提出滚动轴承性能数据的稳健化判断方法、稳健化处理方法、参数与非参数融合分析方法、混沌动力学分析方法、振动性能变异评估以及性能参数的贝叶斯区间评估方法,从而构建出滚动轴承性能变异过程近代统计学融合评估的体系雏形,为深入揭示滚动轴承性能变异的新特性与新机制提供一些新思路。

基于近代统计学理论,在稳健统计学极小极大化原则下,用中位数和 Huber M 估计相融合的方法对性能实验数据进行稳健化处理,该方法不需要阈值与分布函数的先验信息,在 $0\sim 0.1$ 的显著性水平下对实验数据进行稳健化处理,可以有效分离出不稳健数据,对这些数据进行处理,进而得到稳健化实验数据,发现随着显著性水平的提高,数据稳健性明显改善。

基于近代统计学理论,依据参数与非参数可以不受数据的矩、极大似然函数以及分布函数影响的特点,提出参数与非参数融合方法,以评估滚动轴承静态性能。对小批量轴承,提出参数与非参数融合方法,通过性能参数的分析以及非参数的评估,可以鉴别轴承性能的优劣性。

基于混沌理论,用混沌方法分析滚动轴承动态性能。该方法利用相空间重构计算出时间延迟、嵌入维数、最大 Lyapunov 指数、奇怪吸引子、关联盒维数,可以计算滚动轴承性能预测周期,发现物理空间的中位数与相空间的估计关联维数之间具有非线性与非单调性的复杂关系。

依据实际工况,模拟性能退化状态并设置滚动轴承性能退化实验,基于近代统计学理论,利用稳健化统计学原理,找出滚动轴承性能本征区间,建立本征区间、变异率以及稳健化处理数据的中位数和平均值的性能退化评估体系,根据数据特征判断滚动轴承性能退化过程。

基于近代统计学理论,用滚动轴承稳健数据构建贝叶斯方法的先验密度函数,推导出贝叶斯后验密度函数,利用贝叶斯后验密度函数评估滚动轴承参数的区间;与统计学方法相比,该方法可提高滚动轴承性能参数的评估精度。

通过上述近代统计学理论与混沌理论研究,可以揭示滚动轴承性能演变过程的一些新特性,为滚动轴承的应用选择与服役质量评估奠定了一定的理论基础。

本书相关内容得到了国家自然科学基金(51475144 和 51075123)的资助。

本书由河南科技大学夏新涛(负责第 2 章、第 4 章、第 7 章与附表)和三门峡

职业技术学院徐永智(负责第 1 章、第 3 章、第 5 章、第 6 章与第 8 章)撰写,由夏新涛统稿。河南科技大学的硕士研究生白阳、陈士忠、朱文换、叶亮、常振、李云飞、刘斌等参与了本书出版过程中的部分辅助工作。

作 者
2016 年夏

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 滚动轴承概述	1
1.1.1 滚动轴承的类型与用途	1
1.1.2 滚动轴承的失效机理	3
1.1.3 滚动轴承的性能指标	5
1.2 滚动轴承性能研究的现状与进展	6
1.3 滚动轴承性能变异的研究思路	8
1.4 本书的研究内容	9
第 2 章 理论基础	11
2.1 常用统计量	11
2.2 数据的稳健性	12
2.3 数据的稳健性判断	13
2.4 稳健化统计准则	17
2.5 稳健化估计及性质	17
2.5.1 M 估计及性质	17
2.5.2 W 估计	20
2.5.3 L 估计	20
2.6 参数估计与非参数估计	21
2.6.1 参数估计	21
2.6.2 非参数估计	25
2.6.3 参数估计与非参数估计的特点	30
2.7 贝叶斯估计	31
2.8 混沌理论简介	33
2.9 近代统计学融合分析方法的内容构成	36
2.10 本章小结	37
第 3 章 滚动轴承性能数据的稳健性分析方法	38
3.1 滚动轴承性能数据的稳健性判断原理	38
3.2 滚动轴承性能数据的稳健性判断方法	38

3.2.1	数据稳健性判断步骤	38
3.2.2	滚动轴承性能数据稳健化判断的数学模型	39
3.3	滚动轴承性能数据的稳健化分析案例	41
3.3.1	滚动轴承摩擦力矩实验数据的稳健化分析	42
3.3.2	滚动轴承振动实验数据的稳健化分析	63
3.4	讨论	68
3.5	本章小结	69
第 4 章	滚动轴承性能数据的稳健化处理	70
4.1	常用估计方法的特点	70
4.2	数据稳健化处理思路	71
4.3	平均值和中位数与数据离散性的关系	72
4.3.1	正态分布	72
4.3.2	瑞利分布	74
4.3.3	三角形分布	75
4.3.4	均匀分布	76
4.3.5	威布尔分布	77
4.3.6	实际例子	78
4.3.7	数据稳健化处理与数据的离散性	79
4.4	显著性水平的选取	80
4.5	数学模型	82
4.6	数据稳健化处理	84
4.6.1	滚动轴承振动数据稳健化处理	84
4.6.2	滚动轴承摩擦力矩数据稳健化处理	90
4.7	讨论	115
4.8	本章小结	115
第 5 章	滚动轴承摩擦力矩的参数与非参数融合分析	116
5.1	参数与非参数融合分析	116
5.1.1	参数估计	116
5.1.2	非参数估计	117
5.1.3	参数估计与非参数估计的融合	118
5.1.4	数学模型	119
5.1.5	评判方法	123
5.2	滚动轴承摩擦力矩数据分析	123
5.2.1	A 滚动轴承摩擦力矩参数与非参数分析	124
5.2.2	B 滚动轴承摩擦力矩参数与非参数分析	126

5.3	讨论	129
5.4	本章小结	130
第 6 章	滚动轴承性能稳健数据的动态分析	131
6.1	滚动轴承性能的动态分析理论	131
6.2	动态分析数学模型	133
6.2.1	数据稳健化处理	133
6.2.2	混沌分析数学模型	135
6.3	数据分析	138
6.3.1	滚动轴承振动分析	138
6.3.2	A 滚动轴承摩擦力矩动态分析	149
6.3.3	B 滚动轴承摩擦力矩动态分析	172
6.4	讨论	184
6.5	本章小结	184
第 7 章	滚动轴承振动性能变异评估	186
7.1	概述	186
7.2	主要步骤	187
7.3	数学模型	188
7.3.1	绝对值排序序列的获取	188
7.3.2	局域本征区间的获取	188
7.3.3	总体本征区间的获取	191
7.3.4	变异率	191
7.3.5	稳健化分布	191
7.4	实验案例	192
7.4.1	实验条件与实验数据	192
7.4.2	实验数据的稳健性分析	193
7.4.3	数据的变异分析	197
7.5	本章小结	202
第 8 章	滚动轴承性能参数贝叶斯区间评估	203
8.1	贝叶斯理论概述	203
8.2	滚动轴承性能贝叶斯区间评估	204
8.3	滚动轴承性能贝叶斯区间评估的数学模型	205
8.3.1	基本定义	205
8.3.2	贝叶斯后验密度函数推导	206
8.3.3	贝叶斯先验密度函数建立	208
8.3.4	滚动轴承性能参数区间评估	209

8.3.5 贝叶斯评估流程	209
8.4 数据分析	211
8.4.1 A 滚动轴承摩擦力矩数据分析	211
8.4.2 B 滚动轴承摩擦力矩数据分析	216
8.5 讨论	221
8.6 本章小结	221
参考文献	222
附表	225

第1章 绪 论

本章论述滚动轴承的类型与用途，主要内容包括滚动轴承的失效机理，滚动轴承的性能特征，滚动轴承性能研究的现状与进展，滚动轴承性能变异研究的基本思路等。

1.1 滚动轴承概述

滚动轴承主要由外圈、内圈、滚动体、保持架等多个元件组成，特殊情况下可以无内圈或外圈，由相配的轴或轴套代替。滚动体在套圈滚道上滚动，实现轴与机座的相对旋转、摆动或往复直线运动。分离型轴承的保持架把滚动体结合成一个组件，既便于安装，又防止严格分组的滚动体互相混淆。滚动轴承的种类繁多，每种类型又有许多不同的结构形式，以满足不同的需要。

1.1.1 滚动轴承的类型与用途

1. 向心球轴承

向心球轴承是用途最广、生产批量最大的一类滚动轴承。向心球轴承主要承受径向载荷，也可承受少量轴向载荷，径向游隙较大时轴向承载能力增加。摩擦系数小，适于高速运转。向心球轴承广泛用于变速器、电机、仪器仪表、家用电器、内燃机、燃气轮机、交通车辆、农业机械、建筑机械和工程机械等。

2. 双列向心球面球轴承

双列向心球面球轴承的外圈滚道是球面的一部分，曲率中心和轴承中心一致，轴承具有调心性，调整偏斜角可在 3° 以内。接触角小，所以轴向承载能力小。双列向心球面球轴承主要应用于轴易弯曲或加工安装误差较大的部位，如木工机械和纺织机械的传动轴。

3. 向心推力球轴承

向心推力球轴承可以同时承受径向载荷和轴向载荷，也可承受纯轴向载荷。名义接触角有 15° 、 25° 和 40° 等三种，高精度和高速轴承通常取 15° 接触

角。此类轴承有 70 多种不同结构，单列的常成对使用。各种结构的此类轴承广泛用于磨削主轴、高频电动机、燃气轮机、高速离心机、仪器仪表、小轿车前轮等。

4. 推力向心球轴承

推力向心球轴承能承受较重的双向轴向载荷和少量的径向载荷，轴向刚性好，适于较高的转速，主要用于车床、镗床、摇臂钻床等机床主轴。

5. 推力球轴承

推力球轴承的接触角为 90° ，结构是可分离型的，只能承受轴向载荷。带球面座圈的推力球轴承具有调心性，可消除安装误差的影响。钢球因离心力挤向滚道外侧，易于擦伤，所以不适于高速运转。这类轴承主要用于机床主轴、立式车床旋转工作台、汽车转向运动等。

6. 微型球轴承

内径小于 10mm 或外径小于 26mm 的轴承称为微型轴承。微型球轴承主要用于各种仪器仪表、微型电机、陀螺仪、自动控制机构和医疗器械等。

7. 直线运动球轴承

直线运动球轴承由外圈、保持架(又称钢球循环架)和 3~5 列钢球组成。摩擦因数比滑动轴承低很多，一般为 0.001~0.003。这类轴承径向游隙小，直线运动精度高，主要用于数控机床的往复机构、仪表自动记录装置、自动跟踪机构以及冲压模具的导柱等。

8. 圆锥滚子轴承

圆锥滚子轴承的滚子与滚道为线接触或修形线接触，可承受较重的径向和轴向联合载荷，也可承受纯轴向载荷，主要用于汽车的前轮和后轮、机床、机车车辆、轧钢机、建筑机械、起重机械、印刷机械和各种减速装置等。双列圆锥滚子轴承主要用于机床主轴和机车车辆等，四列圆锥滚子轴承用于轧辊支撑等。

9. 向心短圆柱滚子轴承

向心短圆柱滚子轴承的滚子与滚道接触为线接触，径向承载能力及径向刚度都比球轴承高。这类轴承摩擦因数小，适合高速运转，但对与轴承相配合的轴和机座孔的加工精度要求较高，安装后内外圈轴线相对偏斜要严加控

制, 以免造成接触应力集中。向心短圆柱滚子轴承广泛用于大中型电动机、机车车辆、机床主轴、内燃机、燃气涡轮机、减速箱、轧钢机、振动筛以及起重运输机械等。

10. 双列向心球面滚子轴承

双列向心球面滚子轴承的外圈滚道是球面的一部分, 轴承具有内部调心性, 以适应轴与机座孔的相对偏斜, 可承受径向重载荷和冲击载荷, 也可承受一定的双向轴向载荷。这类轴承主要用于轧钢机、造纸机械、工程机械、破碎机、印刷机械以及各种减速装置等。

11. 滚针轴承

滚针轴承的径向尺寸小但径向承载能力很高, 不可承受轴向载荷, 仅作为轴自由端的支撑使用。滚针轴承的摩擦因数大, 特别是没有保持架的满装滚针轴承, 摩擦因数更大, 因而不适合较高的转速。这类轴承主要用于汽车变速箱、万向接头、小型发动机的曲轴和连杆、液压机械等。

12. 推力滚子轴承

推力滚子轴承可承受轴向重载荷, 轴向刚度大, 承载能力比同尺寸的推力球轴承高很多, 主要用于立式电动机、船用螺旋桨轴、旋臂吊车、机床旋转工作台及加压丝杠等。

13. 转盘轴承

转盘轴承是承受重载荷、工作速度很低地转动或摆动的一类特大型轴承, 可承受很大的轴向力, 还可以承受很大的径向力和倾覆力矩。在此类轴承的设计与选用中, 一般不考虑疲劳寿命, 而以额定静载荷作为选择的准则。转盘轴承主要用于矿山机械、工程机械、冶金设备、重型机床、大型仪器与风力发电等重型设备中。

1.1.2 滚动轴承的失效机理

滚动轴承失效机理主要有磨粒磨损、微动磨损、腐蚀磨损、刮伤、胶合、疲劳剥落等。

1. 磨粒磨损

由于轴承的工作状况不同, 轴承的磨损情况也不尽相同。在正常工作环境下,

也会有磨粒(如灰尘、沙粒等坚硬的微粒)进入到轴承的表面;轴承工作时,磨粒会将轴承表面当作研磨的平面,使表面受到损害,这样会出现轴承性能在预期寿命前就急剧恶化的情况,主要是在启动、停车或轴颈与轴承发生边缘接触时,导致几何形状改变、精度丧失、轴承游隙加大。

2. 微动磨损

滚动轴承处于非工作状态时,由于外界振动载荷的作用,或者处于微幅摆动工况时,滚动体在滚道接触区附近会发生微小的相对运动,因为运动幅度很小,润滑油无法在接触区表面重新分布,而使金属表面直接接触,并在氧气的参与下相互作用,造成金属表面的腐蚀,同时产生金属氧化磨屑,这种现象称为滚动轴承的微动磨损,这种磨损是由外界环境引起的不可避免的磨损。

3. 腐蚀磨损

滚动轴承在运行过程中,不可避免接触水、水气以及腐蚀性介质,这些物质会引起滚动轴承的生锈和腐蚀;另外,在滚动轴承运行过程中,还会受到微电流和静电作用,造成滚动轴承的电流腐蚀;滚动轴承的生锈和腐蚀会造成套圈、滚动体表面的坑状锈、梨皮状锈,最终造成轴承的失效。

4. 刮伤

在滚动轴承运行过程中,较大的坚硬杂质进入到轴承间隙中,当发生相对运动时,杂质不会以同等速度进行运动,产生的速度差会使表面划出浅痕或者深沟,导致轴承工作性能丧失。

5. 胶合

轴承长时间连续工作或者保养不当,以及承受载荷过重都会使轴承整体温度急剧升高,导致润滑油膜破裂;在缺少润滑和重载的情况下,轴承表面就会出现黏接在一起的现象,在发生相对运动时,会使轴承表面破裂或者轴承不能运转。

6. 疲劳剥落

长时间重载工作,会使轴承表面金属达到其疲劳极限,表面会出现裂纹,一般疲劳裂纹与运动方向垂直,严重后逐渐扩大,最后金属出现疲劳剥落,造成轴承工作性能丧失。

由于滚动轴承使用场合复杂、环境多变等,滚动轴承工作性能丧失往往是多种失效形式的综合表现。

1.1.3 滚动轴承的性能指标

作为现代机械设备中广泛应用的关键性部件之一，滚动轴承性能对设备的运行质量、可靠性、寿命有重要的影响，滚动轴承的性能主要有摩擦、磨损、润滑、温升等，体现为滚动轴承摩擦力矩、振动、噪声等指标。下面阐述滚动轴承摩擦力矩、振动、噪声及温升的形成过程。

1. 滚动轴承摩擦力矩的形成过程

滚动轴承摩擦力矩是指在滚动轴承运转与启动时，内圈、外圈、保持架、滚动体、密封装置等元件之间产生相对运动，以及润滑剂喷射与拖拽等，产生了各种各样的摩擦阻力矩，即滚动摩擦、滑动摩擦和润滑剂摩擦的总和产生的阻滞轴承运转与启动的阻力矩。它表示轴承运转与启动过程中轻快、灵活的程度，对于灵敏度要求高的轴承，要以摩擦力矩来衡量其旋转灵活性，摩擦力矩越小，灵活性越好。

2. 滚动轴承振动的形成过程

滚动轴承在运转过程中，除轴承各元件间一些固有的、由功能所要求的运动以外的其他一切偏离理想位置的运动均称为轴承振动。轴承运动时产生的振动是很复杂的，目前还不可能完全用某种具体的运动方程加以描述。影响轴承振动的因素也很复杂，如套圈滚道波纹度、粗糙度、表面质量、滚动体尺寸相互差、轴承本身的结构类型、组装游隙、安装条件、润滑条件与工作条件等都会影响轴承工作时的振动。

3. 滚动轴承噪声的形成过程

滚动轴承在运转过程中，由于滚道和滚动体之间相互接触、碰撞而产生振动，当滚动轴承的振动传播到辐射表面时，振动能量转换成压力波，经空气介质再传播出去即为声辐射，其中 20Hz~20kHz 部分为人耳听阈可接收到的声辐射，即为滚动轴承噪声。由振动产生的机械波向空间辐射，引起空气的振动，从而产生声响，这种声响习惯上被称为轴承的噪声。即使轴承零部件表面加工十分理想，清洁度和润滑油或油脂也无可挑剔，在轴承运转时，仍会因滚道和滚动体间弹性接触构成的振动，而产生一种连续轻柔的声响，这种声响被称为轴承的基础噪声。基础噪声是轴承固有的，不能消除。

4. 滚动轴承温升的形成过程

滚动轴承的温升是在运行过程中, 由于外圈、内圈、滚动体、保持架等各元件之间的摩擦与变形产生的热量来不及散发, 使轴承温度升高。温升是衡量滚动轴承运行质量的重要性能指标, 与滚动体的形状与数量及保持架形状与材料有重要关系。

根据上述滚动轴承的失效形式及性能指标, 可以看出, 滚动轴承性能与内部元件、制造精度、安装工艺、调试技术及使用环境有很大关系, 具有多样性和复杂性。因此, 如何研究与评估滚动轴承的性能一直是困扰轴承工业的重要问题^[1-9]。

1.2 滚动轴承性能研究的现状与进展

长期以来, 国内外很多学者一直关注与致力于轴承性能的研究, 并取得了许多成果。例如, Nataraj^[5], Sinou^[7], Ahmad^[10]和 Harsha^[11]分别用时间序列、频率响应和相轨迹等概念进行非线性分析, 探讨轴承系统的稳定性, 发现轴承性能的多变性; Lioulios^[12]用频谱分析、相空间、高阶 Poincare 映射和 Lyapunov 指数方法研究速度波动对轴承动态性能的影响, 认为速度的微量变化会导致系统动态行为的重大变化; 蔡云龙^[13]提出了用 Duffing 混沌振子检测轴承早期故障的相轨迹图法和 Lyapunov 指数法; 姜维^[14]用拟动力学理论分析角接触球轴承的接触力、接触角、旋滚比的变化状态, 认为轴承各性能参数呈现出显著的非线性变化特征, 并发现钢球轴承和陶瓷轴承的动态特性参数具有不同的稳定性; 王黎钦^[15]、赵春江^[16]和何芝仙^[17]分别研究了轴承零件相互作用的力学模型和轴承系统的动力学行为; 夏新涛等^[1-4,8]对轴承摩擦力矩及振动进行了动态分析; 徐志栋^[18]探讨了不同轴向载荷和温度条件下轴承摩擦力矩的波动特性; Douglas^[19]提出了某种聚乙烯材料轴承滚动滑动磨损的分层机理, 以描述磨损碎片的生物活性; 林冠宇^[20]阐明了氯苯基硅油润滑球轴承的润滑机理, 并研究了不同真空度和转速下的轴承摩擦力矩行为; Saad^[21]用声发射技术探讨了滚动轴承表面缺陷的几何尺寸鉴别方法; 黄敦新^[22]由于摩擦高速运转实验发现了陶瓷球以表面裂纹和表层剥离为主的破坏机制, 滚道破坏呈现疲劳裂纹、点蚀和犁痕等多种形式; Abbasion^[23]用小波和支持向量机理论推荐了轴承系统的多故障诊断方法; 杨将新^[24]考虑轴承运行状况下载荷分布、故障冲击脉冲序列组成、损伤部位的位置变化和环境噪声等参数对振动特性的影响, 建立了内圈局部损伤状态的振动模型; Antoni^[25]对轴承振动信号进行谐波分析, 使用了频谱概率密度和标准差概率密度等统计学概念; Ueda^[26]提出了增强寿命概念并进行因

素分析,以提高污染润滑条件下的轴承寿命;郭磊^[27]和 Guo^[28]分别对轴承缺陷进行了多尺度分析、小波支持向量机分类和混沌识别;贾民平^[29]分析了轴承故障信号的循环平稳性;于江林^[30]用声学 and 现代信号分析理论研究了非接触多传感器声学诊断方法,以评估轴承的早期故障;汪久根^[31]用群论将影响轴承噪声的参数分为几何、材料、力学、运动学、动力学、摩擦学与声特性等参数群;Sujeet^[32]介绍了一种用于相对运动硅表面的微型球轴承,以减小微机械和纳米机械的磨损,并探讨了轴承寿命的影响因素。这些研究发现轴承性能具有非线性、多变性^[5-17]、混沌性^[8,33]、多样性^[18-22]以及影响因素复杂性^[23-32],如何评估滚动轴承的性能已经成为轴承工业及相关产业迫切需要解决的问题。

基于上述滚动轴承性能的非线性、多变性、混沌性、多样性及复杂性的特性,滚动轴承性能分析大都采用经典的统计学方法。根据经典统计学方法的根本要求,需要大量的轴承做实验,采集大量的实验数据对滚动轴承的寿命及其可靠度进行分析,并以威布尔分布函数作为数学模型来解决滚动轴承寿命预测问题。这种方法对解决部分大批量使用的通用轴承寿命预测问题,效果很好。然而,随着航天、航空、新能源、新材料、静音设备、高速与重载交通运输等领域的快速发展,对轴承摩擦、磨损、振动、温升等指标及其寿命与可靠度提出新要求。在使用中发现,这些轴承在疲劳破坏前经常出现内部卡死、烧结、磨损、塑性变形、裂纹或断裂等。这些新的特征使传统的轴承性能评估理论遭遇难以解决问题的困境。其主要原因有两个,第一个是这些轴承性能、寿命及其可靠性和传统的有区别,导致失效概念与传统的不同,即将性能丧失而非仅仅疲劳作为失效判据;第二个是这些轴承的使用数量远远小于通用轴承数量,且生产代价昂贵,一般没有大量的轴承做实验。

尤其在新产品轴承研发过程中,如直升机轴承、大飞机轴承、歼击机轴承、核反应堆轴承、新型主战坦克轴承、高速铁路轴承、新型风力发电机轴承以及极端工况轴承等,几乎没有相关性能的概率分布与变化趋势的先验资料。这些轴承的实验数据少,相关信息缺乏,如何利用有限的信息对轴承性能进行有效分析,准确评估与预测未来轴承性能的非线性动力学特征、趋势、概率分布及数字特征的变异历程,是目前亟待解决的重要问题,也是目前国内轴承行业的瓶颈。

将滚动轴承作为研究对象,抽象出时间序列过程,是站在更高的立足点面对新问题,而有效解决该问题的关键是理论上的突破。将近代统计学理论及混沌理论引入轴承性能、寿命特征的实验评估中,研究轴承性能实验分析的新理论和新方法,发现时空域中滚动轴承各种性能的非线性动力学变异新特征,突破数据分析领域长期沿用的经典统计理论体系,不断深化轴承设计理论的应用科学问题研究,形成轴承实验评估的新格局,对现代轴承系统的动态设计与性能分析具有重